

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI

Corso di laurea magistrale in *Scienze per l'Ambiente*

Gli Pteropodi e la loro diagenesi

Tesi di laurea in C.I. Climatologia e Paleoclimatologia

Relatore

Prof. Rossella Capozzi

Presentata da

Cinzia Giampieri

Correlatori

Dr. Marco Taviani

Prof. Claudio Mazzoli

Dr. Paolo Montagna

III sessione

Anno Accademico 2011/2012

1. INTRODUZIONE

1.1 La diagenesi precoce degli pteropodi in ambiente sottomarino

I molluschi gastropodi oloplanctonici, noti come ‘pteropodi’, sono importanti componenti del plancton oceanico e comprendono organismi appartenenti a due ordini diversi: i *Thecosomata* e i *Gymnosomata*. Entrambi gli ordini di pteropodi sono in grado di sintetizzare un esoscheletro carbonatico in forma aragonitica (Lalli & Gilmer, 1989) in fase larvale, ma, mentre i gymnosomati perdono la conchiglia in fase adulta, i tecosomati la conservano per tutto il loro ciclo vitale, e per questo motivo sono stati utilizzati negli studi sull’acidificazione per misurare l’impatto di diminuito pH sull’aragonite. La conchiglia degli pteropodi è molto fragile e sottile, di spessore inferiore al millimetro (Lalli & Gilmer, 1989; Zhang *et al.*, 2011). Queste caratteristiche, secondo Curry (1965), sono dovute all’adattamento alla vita planctonica.

Gli pteropodi sono organismi presenti comunemente in tutti gli ambienti marini pelagici dai poli all’equatore e dalla superficie alla profondità batipelagica. Si trovano tipicamente in oceano aperto e, sebbene possano essere ritrovati in ambiente neritico, non esistono specie costiere (van der Spoel & Dadon, 1999). Gli pteropodi costituiscono un anello fondamentale della rete trofica; ad esempio, alle alte latitudini, rappresentano il 90% dello zooplancton totale e la maggiore componente della dieta per molti altri organismi zooplanctonici e per i predatori di più grandi dimensioni, come aringhe, salmoni, balene e uccelli (Hunt *et al.* 2008, Karnovsky *et al.* 2008).

I tecosomati, essendo i maggiori produttori planctonici di aragonite, hanno un ruolo importante nel ciclo del carbonio oceanico, sia mentre sono in vita, poiché utilizzano gli ioni carbonato e calcio presenti in soluzione acquosa, sia *post-mortem*, poiché le conchiglie affondano e vengono trasferite all’interno dei sedimenti, trasportando carbonato di calcio in forma aragonitica nelle acque profonde. Per tali motivi si ritiene che gli pteropodi tecosomati forniscano un contributo significativo alla rimozione di carbonato dalle acque superficiali (Berner & Honjo, 1981; Blank, 2007) e quindi al trasferimento di carbonio nelle acque profonde (Collier *et al.*, 2000).

Sia durante il trasferimento nella colonna d'acqua che una volta depositati sul fondo, le conchiglie aragonitiche vanno sovente incontro ad una rapida dissoluzione, parziale o totale, in funzione della curva di compensazione dei carbonati e più specificamente di quella dell'aragonite (*Aragonite Compensation Depth*, ACD). Il grado di dissoluzione dei gusci aragonitici all'ACD, è stato utilizzato come indicatore dell'orizzonte di sottosaturazione dell'aragonite (Bernardsek *et al.*, 2012) e sono stati sviluppati diversi metodi per quantificarlo (ad esempio Ruddiman & Heezen, 1967; Almogi-Labin *et al.*, 1986; Bernardsek *et al.*, 2012).

Talvolta invece la conchiglia aragonitica che si trova all'interfaccia acqua-sedimento può essere sottratta ai processi biostratinomici (che agiscono a partire dalla morte dell'organismo fino al suo seppellimento), mediante il processo di diagenesi precoce all'interno del sedimento ospite, che a seconda del pH può impartire fenomeni di macerazione dei carbonati.

I molluschi oloplanctonici sono presenti nel record fossile almeno da 10 milioni di anni, ma la qualità di conservazione del materiale fossilifero non è generalmente troppo elevata. Tipicamente le condizioni di ritrovamento di pteropodi in affioramento sono quelle di modello interno o di calco, spesso deformati, talora senza resti del guscio aragonitico originale. La qualità del modello interno dipende da diversi fattori tra cui la granulometria del sedimento che riempie i vuoti della conchiglia, che deve essere molto fine (argilla o micrite) per riprodurre fedelmente i dettagli della conchiglia originale. Tipicamente si trovano in formazioni marnose o calcareo-marnose appartenenti ai depositi Cenozoici del bacino mediterraneo come ad esempio l' Appennino italiano (es., Oligo-Miocene, Robba, 1977; Manzi *et al.*, 2007) o in quelli dell'arcipelago maltese (es., Miocene, Janssen; 2010).

I record fossili dei thecosomata sono molto abbondanti, dalla loro prima apparizione nel tardo Pleistocene (Janssen & King, 1988). Gli pteropodi fossili sono frequenti nelle associazioni del Quaternario sommerso, e si trovano comunemente inglobati in *hardground*.

In situazione favorevoli, come quelle di bacini sedimentari con temperatura delle acque di fondo particolarmente elevate, lenta circolazione delle masse d'acqua sul fondo, e grado di saturazione dei carbonati ottimale (ad esempio Mar Rosso, Golfo del Messico e lo stesso Mediterraneo; Ivanova *et al.*, 1984; Herman, 1998)

gli pteropodi possono invece conservarsi ed addirittura formare dei veri e propri sedimenti (*pteropod ooze*) spesso in commistione con altre componenti carbonatiche pelagiche (nannoplankton, foraminiferi). Se opportunamente preservati dal contatto con acque sottosature, gli pteropodi seppelliti possono così lasciare un record fossile, estremamente utile in studi paleoclimatici, paleoceanografici e paleoecologici (Diester-Hass, 1972; Buccheri & di Stefano, 1984).

Comunque, anche nei casi in cui gli pteropodi non vadano soggetti a rapida e definitiva dissoluzione sul fondo e vengano dunque inglobati nel record sedimentario, le loro sottili ed aragonitiche conchiglie vanno perlopiù soggette a processi diagenetici che ne comportano una più o meno completa decalcificazione e la comune formazione di modelli interni (*mold, steinkern*) e/o calchi nella matrice (Janssen, 2010). Questa tipologia tafonomica è così diffusa da rappresentare probabilmente la più ricorrente modalità di conservazione degli pteropodi nel record geologico cenozoico.

Nonostante il loro scarso potenziale tafonomico, questi organismi si sono dimostrati eccellenti strumenti biostratigrafici, data la loro ampia distribuzione geografica (Janssen, 2010). Un vantaggio offerto dagli pteropodi in biostratigrafia, rispetto ad altri organismi oloplanctonici (come nannoplankton calcareo, foraminiferi planctonici, radiolari o dinoflagellati) è che le loro conchiglie sono in genere meno suscettibili di conservarsi se rimaneggiate data la loro grande fragilità garantendo quindi una certa affidabilità nella datazione dell'unità sedimentaria che li ospita (Janssen, 2010).

La distribuzione degli pteropodi attuali del Mediterraneo dipende da vari parametri fisici e chimici idrografici, come la temperatura, la salinità, la disponibilità di cibo, l'ossigeno e la profondità dell'acqua (Herman, 1998), ma è principalmente controllata dai gradienti di temperatura e salinità, dovuti alla circolazione anti-estuarina e all'eccesso di evaporazione rispetto agli apporti idrici provenienti dalle precipitazioni e dal *runoff* fluviale (Buccheri e Torelli, 1981). In generale il gradiente di temperatura superficiale degli oceani varia in funzione della latitudine, aumentando progressivamente dalle regioni polari all'equatore. Tale gradiente si riflette sulla distribuzione degli pteropodi, ad esempio la specie *Limacina helicina* è l'unica presente nelle acque polari del Mare Artico, mentre le acque calde e tropicali sono popolate da diverse altre

specie (Herman, 1998).

Il Mediterraneo è un bacino temperato, con un intervallo di temperature che rende possibile la sopravvivenza di diverse specie pteropodi, pertanto presenta una varietà di specie maggiore rispetto agli ambienti estremi come le zone fredde polari, che permettono a poche specie di adattarsi.

Anche il gradiente di salinità è in grado di controllare la distribuzione degli pteropodi, infatti è stato dimostrato che gli pteropodi difficilmente si adattano alle basse e alle alte salinità. Ad esempio nel Mediterraneo, dove le salinità sono più elevate rispetto all'oceano aperto e le temperature sono simili a quelle dell'oceano aperto alle stesse latitudini, vi si ritrova il 75% di specie di oceano aperto, mentre nel Mar Rosso, dove la salinità superficiale supera il valore di 40‰, le specie presenti sono solo il 50% delle specie di oceano aperto (Herman, 1998).

Gli pteropodi hanno una ristretta tolleranza ai cambiamenti in temperatura, salinità, ossigeno e profondità dell'acqua, perciò sono considerati utili indicatori paleoambientali (Herman-Rosenberg 1965, Herman 1968; 1971a), soprattutto per quanto riguarda le variazioni di temperatura e salinità che si sono verificate nel tardo Quaternario (Pleistocene). Nei record sedimentari più antichi (pre-pleistocenici), l'utilizzazione degli pteropodi come indicatori ambientali ha trovato scarsa applicazione a causa della rara conservazione degli pteropodi all'interno dei sedimenti, probabilmente dovuta alla dissoluzione diagenetica selettiva nei confronti delle conchiglie aragonitiche (Herman, 1971; 1973). Sebbene gli pteropodi si preservino scarsamente nei sedimenti pre-Pleistocenici, recentemente Janssen (2012a) ha ritrovato resti di pteropodi all'interno dei sedimenti oligo-miocenici dell'arcipelago maltese, tutti conservati sotto forma di modello interno.

La dipendenza delle associazioni a pteropodi dalla temperatura è stata usata da diversi autori (Van Straaten, 1966, 1967; Chen, 1968; Blanc-Vernet *et al.*, 1969; Pastouret, 1970; Herman, 1971, 1972; Froget & Pastouret, 1972; Almogi-Labin & Reiss, 1977, Buccheri & Torelli, 1981) come strumento di ricerca per analisi paleoclimatiche e per correlazioni stratigrafiche a livello di bacino nelle successioni sedimentarie tardo-pleistoceniche o oloceniche, in particolare nei bacini del Mediterraneo e del Mar Rosso, dove i sedimenti profondi biogenici sono composti principalmente da *ooze* a pteropodi (Herman, 1998). Ad esempio

Herman (1971), studiando i sedimenti pleistocenici del Mediterraneo, ha osservato che la sostituzione di una specie di pteropodi con un'altra in livelli sedimentari continui coincide con la variazione della popolazione dei foraminiferi platonici, che sono gli indicatori più utilizzati per ricostruire il passato climatico. Le variazioni nella composizione delle associazioni faunistiche in livelli di sedimento continui riflettono i cambiamenti nelle condizioni climatiche e idrologiche al momento della loro deposizione (Herman 1998). Gli studi micropaleontologici sui sedimenti del Mediterraneo (Herman, 1972) hanno permesso di ricostruire la paleoclimatologia del Mediterraneo durante il Quaternario.

Le variazioni degli andamenti di temperatura e salinità delle acque profonde e superficiali, che sono avvenute durante le pulsazioni climatiche tardo-quaternarie (pleistoceniche), hanno causato considerevoli cambiamenti nella distribuzione, nell'abbondanza e nella composizione delle specie di pteropodi, rispetto alle associazioni attuali (Herman, 1972; Buccheri & Torelli, 1981).

Il Pleistocene è stato marcato da ripetute fluttuazioni globali nella temperatura che consistono nell'alternanza tra episodi glaciali e periodi interglaciali più miti (Herman, 1998). Le correlazioni biostratigrafiche, accompagnate da datazioni radiometriche, indicano che le oscillazioni climatiche nel Mediterraneo sono sincrone con quelle dell'oceano Atlantico e del Mar Rosso (Herman, 1972). Le oscillazioni nella temperatura e nella salinità sono state riconosciute per la presenza di pteropodi indicatori di acque fredde o di bassa salinità, o comunque per la variazione delle associazioni faunistiche. Ad esempio durante i periodi glaciali le salinità erano simili a quelle attuali mentre le temperature, molto inferiori rispetto alle attuali, portarono nel Mediterraneo delle specie subpolari del Nord Atlantico e del Mare del Nord, come *Limacina helicina*. Durante gli interglaciali è stata registrata una diminuzione di salinità, causata dallo scioglimento delle calotte glaciali e delle acque dolci fluviali, che è stata riconosciuta per la dominanza del genere *Creseis*, che presenta un'elevata tolleranza alle variazioni di salinità (Herman, 1998).

Il lavoro consiste, innanzitutto, nella selezione di conchiglie a diverso grado di diagenesi, da fresche a modello interno, che testimonino diversi aspetti di diagenesi progressiva degli esoscheletri aragonitici e nell'analisi di tali campioni al microscopio ottico e successivamente quello a scansione, per determinarne il

diverso grado di conservazione della conchiglia e per valutarne la dissoluzione preferenziale delle parti mineralizzate aragonitiche. In pratica lo studio si concentrerà sul processo di diagenesi precoce all'interno dei sedimenti superficiali, con particolare attenzione all'effetto delle fasi del processo sulla conservazione degli esoscheletri aragonitici.

Lo studio prende in considerazione pteropodi pleistocenici e attuali in diverso stato di conservazione, provenienti dalla porzione più superficiale dei sedimenti marini profondi del Mediterraneo centrale. Il vantaggio dell'utilizzo di pteropodi sepolti all'interno di sedimenti marini è quello di avere del materiale non soggetto alle modificazioni diagenetiche in ambiente subaereo, quali quelle che si incontrano normalmente in affioramento. D'altra parte l'utilizzo di conchiglie sub fossili permette di analizzare lo stato di conservazione delle conchiglie indipendentemente dal problema dell'acidificazione antropica degli oceani. In questo modo è possibile isolare il segnale diagenetico dell'ambiente sottomarino. Questo segnale può essere utilizzato come base per gli studi futuri sull'acidificazione e per interpretazioni paleo ambientali dei passati eventi di acidificazione.

La scelta di organismi rappresentativi delle diverse fasi del processo diagenetico permette di osservare l'evoluzione del processo di diagenesi precoce all'interno dei sedimenti superficiali di mare profondo.

L'interpretazione dei segnali di corrosione dell'esoscheletro degli pteropodi avverrà alla luce del confronto tra gli effetti della dissoluzione preferenziale dell'aragonite in ambiente diagenetico e gli effetti di dissoluzione dell'esoscheletro aragonitico dei tectosomati, dovuti a condizioni acidificanti nell'ambito di esperimenti condotti su pteropodi vivi, in modo da discriminare il segnale diagenetico.

L'obiettivo dello studio è quindi quello di contribuire all'esame di pteropodi quaternari, che non sono stati esposti agli effetti dell'acidificazione e di interpretare i processi diagenetici che hanno subito, in base al loro stato di conservazione.

1.2 Il fenomeno dell'acidificazione degli oceani

Il sistema carbonatico oceanico costituisce una parte fondamentale del ciclo biogeochimico del carbonio, ed è regolato da delicati equilibri chimici, fisici e

biologici. Le alterazioni del ciclo del carbonio sono principalmente dovute alle emissioni antropiche di anidride carbonica in atmosfera, che influenzano la distribuzione di CO_2 negli oceani, modificando gli equilibri chimici tra le masse d'acqua e l'atmosfera, e producendo effetti sugli ecosistemi marini. Tali equilibri sono regolati dagli scambi gassosi all'interfaccia aria-acqua e una loro variazione modifica la concentrazione delle specie chimiche carbonatiche presenti in soluzione, quali la CO_2 disciolta nell'acqua marina, l'acido carbonico (H_2CO_3), lo ione bicarbonato (HCO_3^-) e lo ione carbonato (CO_3^{2-}).

L'aumento della pressione parziale di anidride carbonica in atmosfera e il conseguente aumento dell'idrolisi di CO_2 nell'acqua marina è un processo noto come "acidificazione degli oceani" e consiste nell'aumento di acidità delle acque, dovuto alla reazione tra la CO_2 disciolta negli oceani e le molecole d'acqua. Tale reazione dà origine all'acido carbonico (H_2CO_3), una specie acida diprotica poco stabile, che si trova quasi esclusivamente dissociata sotto forma di ioni idrogeno (H^+) e ioni bicarbonato (HCO_3^-). L'aumento di CO_2 in atmosfera va quindi ad aumentare la concentrazione di H^+ e di conseguenza fa diminuire il pH dell'acqua marina dell'ordine del decimo di unità. Nel periodo dal 1750 al 2000 gli oceani hanno assorbito circa un terzo delle emissioni atmosferiche di CO_2 di origine antropica e il conseguente aumento di CO_2 disciolta nelle acque oceaniche ha portato ad una riduzione di 0,1 unità del pH totale superficiale, che è passato da 8,2 a 8,1 unità (Hönisch *et al.*, 2009). Se le emissioni dovessero continuare indisturbate il pH potrebbe diminuire perfino di 0,7 unità (Zeebe *et al.* 2008).

L'acidificazione degli oceani può influenzare la "salute" dell'ecosistema marino poiché agisce direttamente sui processi fisiologici degli organismi, ad esempio, negli invertebrati marini che secernono un esoscheletro carbonatico, la diminuzione della concentrazione degli ioni carbonato può agire sul processo di biomineralizzazione, riducendo il tasso di calcificazione degli organismi stessi (ad esempio Comeau *et al.*, 2010).

Gli organismi calcificatori marini sono in grado di mediare la precipitazione del carbonato di calcio CaCO_3 , a partire dagli ioni calcio (Ca^{2+}) e carbonato (CO_3^{2-}).

La stabilità del carbonato di calcio nell'acqua marina è determinata dal suo stato di saturazione: se l'acqua di mare è sovrassatura rispetto a CaCO_3 , si avrà deposizione di CaCO_3 , al contrario, se è sottosatura si avrà dissoluzione di CaCO_3 , mentre se è satura, l'organismo è in equilibrio con la soluzione acquosa.

Le maggiori forme minerali biogeniche del carbonato di calcio presenti nell'ambiente marino sono: aragonite e calcite, isomorfe del CaCO_3 , e la calcite magnesiacca, che è una specie di calcite in cui ioni calcio sono sostituiti da ioni magnesio. Tra queste la forma minerale meno stabile è l'aragonite, poiché ha una solubilità 1,5 volte maggiore rispetto alla calcite.

Il principale effetto dell'acidificazione consiste nella riduzione dello stato di saturazione delle acque rispetto al CaCO_3 , che ha un forte impatto sugli organismi marini calcificatori come documentato ad esempio da studi su molluschi planctonici e bentonici, echinodermi e coralli (Doney et al., 2009). La diminuzione dello stato di saturazione delle acque è legato alla riduzione della concentrazione degli ioni carbonato (CO_3^{2-}), fondamentali per la biomineralizzazione, in favore degli ioni bicarbonato (HCO_3^-), che non sono direttamente utilizzabili dagli organismi.

Lo studio degli effetti dell'acidificazione sull'ecosistema marino ha preso piede negli ultimi anni ed è un importante campo di ricerca, soprattutto per quanto riguarda le previsioni future dell'aumento delle emissioni di CO_2 in atmosfera (Orr et al., 2005; Hönlisch et al., 2009) e il relativo impatto sugli organismi calcificatori marini (Guinotte & Fabry 2008; Gattuso & Hansson, 2012). L'acidificazione degli oceani e la conseguente modificazione della chimica delle masse d'acqua possono influenzare gli organismi calcificatori in due modi: riducendo il tasso di calcificazione degli organismi o sciogliendo l'esoscheletro carbonatico (Bernard et al., 2012). Per valutare gli effetti dell'acidificazione sull'ecosistema marino sono stati presi in considerazione gli organismi più sensibili a questo processo, sulla base della forma minerale costituente il loro esoscheletro.

1.3 Acidificazione degli oceani e potenziali conseguenze sugli pteropodi

Gli pteropodi tecosomati sono considerati gli organismi più vulnerabili al cambiamento delle condizioni chimiche dell'acqua marina poiché la loro conchiglia aragonitica è più sensibile alla dissoluzione rispetto ai resti scheletrici calcitici di foraminiferi e coccolitoforidi (Herman, 1998). Inoltre, a causa delle loro dimensioni relativamente grandi (possono raggiungere la taglia di un centimetro), rappresentano i maggiori produttori planctonici di aragonite e la loro perdita potrebbe influenzare negativamente il bilancio del carbonio oceanico.

Diversi studi dimostrano che all'aumentare delle emissioni antropiche di CO₂ e della CO₂ disciolta, gli pteropodi vivi reagiscono con una riduzione del tasso di calcificazione (Comeau *et al.*, 2009) e con la costruzione di esoscheletri più sottili (Lischka *et al.*, 2011).

Secondo Orr *et al.* (2005), la specie *Clio pyramidata* mostra una rapida risposta all'aumento di pCO₂ nelle acque, e se dovessero avverarsi le condizioni previste dallo scenario IS92a dell'IPCC (2008) per il 2100, questa specie potrebbe non essere più in grado di secernere il suo esoscheletro carbonatico influenzandone la sopravvivenza.

Se le acque superficiali ad alte latitudini dovessero diventare sottosature rispetto all'aragonite entro il prossimo secolo, gli pteropodi potrebbero essere eliminati da tali regioni, con conseguenze sulle dinamiche delle reti trofiche e su altri processi ecosistemici (Fabry *et al.*, 2008).

Comeau e collaboratori (2009) hanno evidenziato che la specie artica *Limacina helicina* mostra una riduzione del tasso di calcificazione, quando viene sottoposta ad elevati livelli di pCO₂, e addirittura secondo Lischka *et al.* (2011) l'aumento di pCO₂ sugli stadi giovanili della stessa specie, ha come effetto un aumento della mortalità e della degradazione della conchiglia, che si ripercuotono sulla riduzione della riproduzione della specie e di conseguenza sull'abbondanza della popolazione.

La maggior parte degli esperimenti sull'acidificazione si è concentrata sugli pteropodi tipici di zone fredde, come la specie artica *Limacina helicina* (Comeau *et al.*, 2009; Lischka *et al.*, 2011), mentre solo pochi (es. Comeau *et al.*, 2010) si sono occupati di valutare l'effetto dell'aumento della CO₂ disciolta sugli organismi tipici di ambienti temperato-caldi, come ad esempio il Mediterraneo. La ragione dipende dal fatto che i sistemi alle alte latitudini sono considerati i più sensibili all'aumento delle emissioni di CO₂, a causa della maggiore solubilità di quest'ultima nelle acque fredde.

Secondo Comeau *et al.* (2010) la variazione dello stato di saturazione del carbonato di calcio durante la stagione invernale influenza la sintesi della conchiglia delle larve di *Cavolinia inflexa*, una specie molto comune nel Mediterraneo, che si riproduce in questo periodo.

L'esoscheletro dell'organismo ha, in natura, un'importanza sia geochemica che biologica, poiché da una parte detiene un ruolo fondamentale nel ciclo del

carbonio, e dall'altra svolge una funzione di difesa per l'organismo, che è in grado di sottrarsi all'attacco dei predatori ritirando il proprio corpo all'interno della conchiglia (Lalli & Gilmer, 1989).

Il primo lavoro che pone l'attenzione sulle risposte metaboliche degli organismi (es consumo di ossigeno, escrezione di ammoniaca) all'aumento della CO₂ disciolta, è quello di Maas *et al.* (2011), che ha dimostrato che le specie reagiscono diversamente all'aumento dell'anidride carbonica indotto, in funzione dell'ambiente naturale in cui vivono. Di conseguenza la chimica dell'ambiente naturale può influenzare la resilienza delle singole specie di pteropodi all'acidificazione degli oceani.

In generale gli studi che si occupano di valutare gli effetti dell'acidificazione sugli pteropodi vivi tentano di estrapolare le conseguenze di questo processo a partire dalle risposte immediate degli organismi nell'ambito di esperimenti che si svolgono su brevi scale temporali.

Non si conosce pertanto la capacità di adattamento degli organismi calcificatori ai cambiamenti nella chimica delle acque (Fabry *et al.*, 2008), poiché esistono ancora pochi esperimenti sulle risposte fisiologiche degli pteropodi (ad esempio Maas *et al.*, 2011).

D'altra parte lo studio dei passati cambiamenti nella chimica degli oceani è importante per interpretare le attuali perturbazioni del clima, sulla base delle informazioni fornite dal record geologico e paleontologico. Infatti è stato dimostrato che gli pteropodi possono essere utilizzati come indicatori della passata condizione di saturazione degli oceani rispetto al carbonato. Ad esempio Wall-Palmer e collaboratori (2012), tramite le analisi delle carote di sedimento provenienti dal Mar dei Caraibi, hanno dimostrato che le variazioni nella calcificazione degli pteropodi sono strettamente legate ai cambiamenti globali nella pCO₂ e nel pH, durante gli ultimi cicli glaciali-interglaciali. Questi risultati sono in accordo con gli esperimenti effettuati sugli pteropodi vivi (ad esempio Orr *et al.*, 2005; Comeau *et al.*, 2010; Lischka *et al.*, 2011) che mostrano che le variazioni nel pH delle acque ha effetto sul tasso di calcificazione degli organismi (Wall-Palmer *et al.*, 2012).

2. MATERIALI E METODI

2.1 Materiali

Crociera	Stazione	Campionatura	Coordinate		Profondità (m)	Litologia
			Lat (N)	Long (E)		
J 73	17	Draga da roccia a bocca quadra	da 38° 18.7' a 38° 19.3'	da 17° 46.0' a 17° 44.7'	2589 2059	Fango, argilla, sabbia, ghiaia, calcari recenti
T 74	65	Draga da roccia a bocca tonda	da 38° 52.8' a 38° 50.0'	da 14° 10.6' a 14° 09.8'	3120 2510	Fango, calcari recenti

Tab. 1. Informazioni relative ai campioni tratte dal Rapporto tecnico (Sartori, 1977)

La maggior parte dei campioni è stata raccolta tramite draga geologica (o draga da roccia), costituita da un pesante cilindro in ferro legato con delle catene, che colpisce il fondale marino e viene trascinato lungo un tragitto. La draga è utilizzata per campionare il substrato roccioso (rocce o sedimenti litificati), ma spesso vengono intercettati anche sedimenti molli di diverse età. Difficilmente è possibile ricostruire la reale posizione stratigrafica dei campioni. L'età dei sedimenti e delle specie ritrovate al loro interno è stimata compresa tra il Tardo Pleistocene e l'Attuale. In generale, in Mediterraneo, i sedimenti olocenici sono rappresentati da sottili (anche meno di un metro) drappaggi di argille e fanghi.

I campioni esaminati in questo lavoro consistono in un database ristretto, che comprende sia singoli esemplari che esemplari inglobati in hardground, in parte basato sul lavoro tassonomico di Janssen (2012) sui molluschi oloplanctonici,



Fig. 1. Area di studio. In figura sono indicati i siti da cui provengono i campioni analizzati in questo lavoro.

Le descrizioni dei campioni di sedimento fanno riferimento a Janssen (2012); da questi campioni sono stati prelevati gli esemplari isolati.

J73-17: il campione è costituito da 125 grammi di argilla gialla, il residuo sul setaccio è di 48 grammi, contenente grandi fosforiti di colore marrone e frammenti di roccia grigio-giallastra, colonizzate da epibionti e inglobanti *Limacina retroversa*. I campioni contengono abbondanti e isolate esemplari di *Limacina retroversa*. Sono presenti modelli interni di *Cavolinia tridentata* e diverse *Clio pyramidata* f. *lanceolata*.

T74-65: il campione è costituito da 120 grammi di residuo sul setaccio di 0.25 mm ed è caratterizzato dall'abbondanza di piccoli frammenti di materiale litificato (calcare), a cui si associano resti di pteropodi, quali *Clio*, *Limacina* e *Cavolinia*.

In questo lavoro sono stati analizzati esemplari isolati appartenenti a diverse specie di Thecosomata (solo un esemplare appartiene all'ordine Littorinomorpha), per un totale di 30 esemplari isolati.

2.2 Metodi

Tutti gli esemplari sono stati analizzati e fotografati mediante stereomicroscopio ottico, MEIJI Techno, equipaggiato con fotocamera digitale con risoluzione massima integrata 24 Megapixel utilizzando il software Deltapix pro, che permette di lavorare su diversi piani focali e di comporre ogni singola fotografia, in modo da avere un'immagine del campione perfettamente a fuoco in ogni punto.

Questa prima parte del lavoro è stata effettuata presso l'ISMAR-CNR di Bologna. La seconda parte del lavoro consiste nella selezione di alcuni esemplari della specie, che modalmente all'interno dei campioni è più abbondante (*C. pyramidata*), distinti in classi di preservazione. In particolare sono stati scelti 5 esemplari di *C. pyramidata* per lo studio della microstruttura dell'esoscheletro 'in sezione' (primo set di campioni) e 4 esemplari per le analisi morfologiche dell'intera conchiglia (secondo set di campioni).

I due set di campioni sono stati sottoposti a diversi tipi di analisi:

- Analisi al microscopio a scansione SEM (Scannig Electron Microscope)
 1. Analisi su sezioni lucide
 2. Analisi morfologiche
- Mappe geochemiche

Le analisi sono state effettuate presso le strutture del dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova, in particolare il Laboratorio di Sezioni Sottili e il Laboratorio di Microscopia Elettronica S.E.M., In Tab. 2 è indicato specificatamente il tipo di analisi effettuato per ogni set.

1° set <i>Clio pyramidata</i>	2° set <i>Clio pyramidata</i>
Microscopio ottico (campione intero)	Microscopio ottico
Microscopio ottico (sezione lucida)	—
Analisi al SEM su sezioni lucide	Analisi morfologiche al SEM
Mappe geochemiche (sezione lucida)	—

Tab. 2. Per ogni set sono state elencate il tipo di analisi effettuate.

2.2.1 Analisi al microscopio elettronico a scansione

Il Microscopio Elettronico a Scansione (SEM) è uno strumento che sfrutta come fonte luminosa un fascio di elettroni, analizzando i vari segnali prodotti dall'interazione tra gli elettroni stessi e il campione in esame. Il SEM è in grado di ottenere immagini ad elevata risoluzione e può fornire, oltre alle informazioni

morfologiche, anche la microstruttura e la composizione chimica del campione. Queste informazioni diverse si ottengono interpretando i diversi segnali emessi dal campione stesso, in seguito all'eccitazione da parte del fascio di elettroni che lo colpiscono. Lo strumento utilizzato presso il Laboratorio di Microscopia Elettronica del Dipartimento di Geoscienze di Padova è il modello CamScan MX2500.

Le componenti principali di un microscopio elettronico a scansione sono:

- un cannone elettronico, dove viene creato il fascio di elettroni,
- una camera da vuoto, dove il campione interagisce con il fascio di elettroni,
- dei rilevatori (*detector*) per ogni tipo di segnale da analizzare,
- uno schermo in cui viene ricostruita l'immagine del campione.

La sorgente di illuminazione, posta all'interno del cannone elettronico, è costituita da un cristallo di esaboruro di lantanio (LaB_6). Il cristallo viene portato ad elevate temperature, grazie ad un circuito di riscaldamento alimentato in corrente continua, e, sfruttando l'effetto termoionico, emette particelle cariche negativamente. Gli elettroni emessi vengono convogliati verso l'anodo, posto al di sotto della sorgente, che è in grado di imprimere un'accelerazione agli elettroni attraverso la colonna. Il fascio di elettroni attraversa una serie di lenti elettromagnetiche poste a diverse altezze della colonna. La lente finale deflette il fascio all'esterno della colonna e lo convoglia all'interno della camera da vuoto, permettendo la scansione sulla superficie del campione (Fig. 2).

Per permettere l'osservazione del campione, è necessario creare il vuoto all'interno del microscopio, in modo da ridurre l'interazione tra gli elettroni e le molecole dei gas contenuti nell'aria. Ciò avviene nella camera da vuoto dove viene garantita una pressione dell'ordine di 10^{-4} o 10^{-5} mbar, grazie ad una pompa rotativa che aspira l'aria.



Fig. 2. SEM CamScan MX2500 utilizzato per le analisi in questo studio.

Per far sì che il fascio di elettroni interagisca con il campione è necessario rendere conduttivi i campioni che non lo siano naturalmente. I campioni devono essere ricoperti da uno strato sottilissimo di un elemento conduttore (grafite o oro), in modo da rendere conduttiva la superficie del campione, tale operazione viene detta metallizzazione.

Quando il fascio di elettroni colpisce la superficie del campione, avviene un'interazione tra gli elettroni primari del fascio incidente e gli atomi che costituiscono la materia del campione, in seguito alla quale si ha un'emissione di diversi tipi di segnali. I segnali vengono poi raccolti da appositi detector, posti nelle immediate vicinanze del campione. Per individuare le differenti tipologie di segnale si sfruttano dei *detector* o rilevatori appositi.

Quando il fascio di elettroni colpisce il campione, gli elettroni del fascio iniziano ad interagire con le nuvole elettroniche degli atomi di cui è costituito il campione, tale interazione ha come risultato la produzione di una notevole quantità di segnali, i principali sono: gli elettroni secondari, elettroni retrodiffusi e raggi X. Ogni segnale è potenzialmente in grado di generare un'immagine.

Il microscopio a scansione utilizzato per queste analisi è dotato di 3 detector:

- elettroni secondari *Secondary Electrons* (SE)
- elettroni retrodiffusi, di *Backscatter Electrons* (BSE)
- detector dei raggi X, *Energy Dispersive X-rays Spectroscopy* (EDS) o *Energy Dispersive Analysis of X-rays* (EDAX)

Il microscopio elettronico, a differenza del microscopio ottico non fornisce un'immagine reale del campione, ma ne ricostruisce un'immagine virtuale a partire dai segnali emessi dal campione stesso.

I segnali vengono raccolti da appositi detector sotto forma di segnale analogico, e convertiti successivamente in digitale.

Il segnale degli elettroni secondari viene utilizzato principalmente per ricostruire e analizzare la morfologia del campione. L'immagine risultante in toni di grigio, mette in risalto l'aspetto tridimensionale dell'oggetto in esame.

L'analisi degli elettroni retrodiffusi permette di ottenere la distribuzione spaziale delle fasi minerali presenti all'interno del campione. Il segnale di *backscattering* dipende dal peso atomico medio del materiale di cui è costituito il campione. L'immagine risultante, in toni di grigio, mette in risalto la diversità di composizione chimica delle diverse parti che compongono il campione. Le parti più chiare dell'immagine corrispondono a materiali con peso atomico più elevato, mentre le parti più scure corrispondono a pesi atomici inferiori, il nero corrisponde a non emissione e quindi alle parti vuote del campione. L'analisi dei BSE viene utilizzata principalmente per i campioni in sezione sottile o in sezione lucida.

Il segnale della radiazione X invece non fornisce un'immagine del campione legata al contrasto topografico o compositivo e dell'area interessata. Lo scopo della microanalisi non è quello di ricostruire l'immagine del campione, ma quello di ottenere un'analisi chimica puntuale del campione in esame. Da questa analisi si ottiene uno spettro di raggi X, da cui si può risalire alla composizione chimica del materiale analizzato, poiché ad ogni picco corrisponde una precisa specie chimica, determinata in base al numero atomico.

La radiazione X deriva dalla ionizzazione dell'atomo nelle orbite più interne, da parte del fascio incidente, che è in grado di espellere un elettrone dall'orbita dell'atomo del campione. L'atomo così ionizzato può riacquisire stabilità occupando il livello energetico vacante con un elettrone degli orbitali più esterni. L'elettrone più esterno durante il passaggio al livello energetico inferiore emette una radiazione, la cui frequenza corrisponde alla radiazione X. Le radiazioni X

emesse sono caratteristiche dell'atomo che le ha prodotte e ne consentono il riconoscimento.

Il bombardamento elettronico, oltre allo spettro caratteristico genera una radiazione di fondo dovuta all'interazione tra gli elettroni primari e i nuclei degli atomi, perciò si utilizzano dei sistemi di rivelazione (spettrometro EDS) che permettono di analizzare e separare le diverse energie delle radiazioni. Dalla misura di queste radiazioni si ricava la composizione chimica del campione.

Lo spettro a raggi X può essere visualizzato come un istogramma di intensità dei raggi X in funzione dell'energia.

L'analisi dei raggi X può essere divisa in qualitativa e quantitativa. L'analisi qualitativa è legata alla determinazione della presenza degli elementi in un campione e di una misura approssimativa della loro abbondanza, specialmente come una tendenza attraverso il campione. Le analisi qualitative includono analisi di rilievo, profili lineari e mappe a raggi X.

L'analisi quantitativa ha come obiettivo la determinazione della composizione elementare in uno o più punti. Tale analisi richiede molti requisiti, che riguardano la tipologia del campione, che tutti gli elementi debbano essere misurabili e l'utilizzo di uno standard specifico per ogni elemento.

L'analisi al microscopio a scansione è una tecnica che presenta molti vantaggi, di notevole importanza è il fatto di non essere una indagine distruttiva, il campione viene alterato solo da una patina di grafite durante la sua preparazione.

L'analisi su sezione lucida viene effettuata sul primo set di campioni, costituito da 5 esemplari di *Clio pyramidata*. Le sezioni lucide si ottengono inglobando gli pteropodi in resina epossidica e smerigliandoli fino a mettere in luce la sezione voluta. Le conchiglie degli esemplari di *C. pyramidata* sono state sezionate perpendicolarmente alle piastre dorso-ventrali e lungo l'asse maggiore. Le sezioni così ottenute sono state fotografate allo stereomicroscopio e in seguito analizzate al SEM.

L'analisi morfologica è stata effettuata sul secondo set di campioni, costituito da 4 esemplari di *C. pyramidata*.

L'analisi su sezione lucida richiede una preparazione piuttosto lunga del campione, mentre per le analisi morfologiche si utilizza il campione integro.

In entrambi i casi gli esemplari devono essere resi conducibili tramite metallizzazione con grafite; lo strumento utilizzato è il carbonatore Emitech K950X Turbo Evaporator (Fig. 3).



Fig. 3. Metallizzatrice Emitech K950X Turbo Evaporator utilizzata per la preparazione dei campioni per le analisi al SEM.

2.2.2 Preparazione delle sezioni lucide per l'analisi al SEM

La preparazione dei campioni è stata effettuata presso il laboratorio sezioni sottili del Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova. I campioni sono stati posizionati su supporti di resina epossidica solida di circa 3 centimetri di diametro, sagomati in modo da appoggiare i campioni in posizione laterale. I supporti sono stati trasferiti in contenitori cilindrici all'interno dei quali è stata versata la resina epossidica liquida (Araldite 2020), rispettando la stessa miscela della resina solida (10 parti di resina e 3 di indurente). Per eliminare eventuali bolle d'aria prima della solidificazione della resina, si effettua l'impregnazione del campione sottovuoto, tramite lo strumento CitoVac (Struers). I campioni vengono fatti seccare in forno a 40°C per almeno 8 ore, al termine delle quali si estrae il cilindro di resina solidificata dallo stampo. Il cilindro viene smerigliato

prima tramite l'operazione di lappatura automatica su uno strato di carburo di silicio posto su una piastra rotante in ghisa, e in seguito si smeriglia manualmente facendo roteare la pastiglia di resina su un piatto di vetro su cui si versa una miscela di acqua e carburo di silicio. I campioni sono stati consumati fino a mettere in luce il piano perpendicolare alle superfici dorso-ventrali dello pteropode. Le pastiglie di resina sono state lucidate tramite gli strumenti Labopol 35 (Struer). Ogni lucidatrice è dotata di una piastra rotante di alluminio coperta da un panno di seta, sul quale si eroga una sospensione diamantata. Per la prima lucidatrice si utilizza una sospensione diamantata da 6 μm , mentre sulla seconda si eroga una sospensione di granulometria più fine (1 μm). A questo punto i cilindri di resina vengono ulteriormente lucidati utilizzando una sospensione di silice colloidale. I campioni così preparati vengono puliti con bagno ad ultrasuoni ed asciugati.

2.2.3 Mappe chimiche degli elementi

Le mappe chimiche degli elementi presenti all'interno del campione vengono costruite tramite il *detector* EDAX, che rileva il segnale della radiazione X, emessa durante l'analisi del campione al SEM.

In questo caso non si effettua un'analisi puntuale sul campione, ma si ricostruisce un'immagine dello stesso, sfruttando la radiazione X emessa dai singoli elementi. L'immagine a colori risultante consiste nella rappresentazione della variazione della concentrazione di ogni elemento all'interno dell'area esaminata. Le differenze di concentrazione sono rappresentate da variazioni dell'intensità del colore scelto per identificare l'elemento indagato. L'intensità del colore è proporzionale alla quantità dell'elemento presente, pertanto una colorazione più scura corrisponde ad una maggiore concentrazione dell'elemento analizzato, mentre una più chiara corrisponde ad una minore concentrazione.

L'analisi permette di costruire una mappa chimica per ogni elemento da analizzare, è quindi uno strumento utile per evidenziare eventuali variazioni della concentrazione dell'elemento considerato. Non essendo possibile discriminare quali siano gli elementi presenti all'interno del campione, è prima necessario individuare gli elementi chimici presenti attraverso un'indagine dello spettro a raggi X EDS, che rappresenta l'intensità della radiazione X in funzione

dell'energia. Attraverso l'interpretazione dello spettro, nel quale ogni picco corrisponde ad un elemento caratteristico, si individuano gli elementi presenti, da utilizzare poi per la costruzione delle mappe.

3. SISTEMATICA

3.1 Sistematica dei molluschi oloplanctonici del Mediterraneo

In questo capitolo viene illustrata la sistematica dei molluschi oloplanctonici del Mediterraneo e vengono fornite informazioni essenziali sulla loro ecologia con particolare riferimento agli adattamenti allo stile di vita planctonico.

Il Phylum dei molluschi nel Mar Mediterraneo è uno dei più ricchi in specie (oltre 2100 specie) e rappresenta il 18% dell'intera fauna marina del Mediterraneo, mentre la classe dei Crostacei (Phylum degli Arthropoda) ne rappresenta il 19% e il Phylum degli Annelida il 10%.

All'interno del phylum dei molluschi, la classe dei Gasteropodi mediterranei è quella più ricca in specie, poiché comprende 1558 specie e rappresenta il 73% dei molluschi.

I molluschi sono principalmente bentonici, ma all'interno dei Gasteropodi la classe dei Cefalopodi comprende organismi principalmente nectonici (45 specie), mentre gli organismi che hanno sviluppato uno stile di vita oloplanctonico, sono essenzialmente gli Heteropoda (14 specie) e i Thecosomata (49 specie) (Sabelli & Taviani, in stampa).

I molluschi bentonici in senso stretto sono quelli che trascorrono tutto il loro ciclo vitale sul fondale oceanico, gli organismi nectonici sono in grado di spostarsi attivamente all'interno della colonna d'acqua, mentre i molluschi planctonici si muovono grazie al flusso delle correnti marine.

I molluschi planctonici e in generale tutti gli organismi planctonici possono essere ulteriormente classificati, sulla base del loro ciclo vitale, in oloplanctonici e meroplanctonici. Gli organismi oloplanctonici sono quelli che trascorrono tutto il loro ciclo vitale galleggiando all'interno della colonna d'acqua, mentre quelli meroplanctonici trascorrono solo una parte della loro vita allo stadio planctonico, generalmente la fase larvale, per poi passare allo stadio bentonico.

All'interno dei gasteropodi, solo un numero relativamente piccolo di specie ha sviluppato un adattamento alla vita pelagica per tutto il ciclo vitale. I gasteropodi oloplanctonici più noti sono gli Pteropoda e gli Heteropoda e comprendono gruppi sistematici molto lontani fra loro, per cui si ritiene che abbiamo sviluppato degli adattamenti alla vita pelagica differenti e in maniera indipendente l'uno

dall'altro. I nomi di questi gruppi sono ormai obsoleti, ma vengono tuttora utilizzati, in particolare il termine Pteropoda viene utilizzato per designare gli ordini dei Thecosomata e dei Gymnosomata per gli Pteropoda, mentre il termine Heteropoda indica gli ordini Littorinimorpha e Pterotracheoidea (Bouchet & Rocroi, 2005).

La classe Gastropoda (Cuvier, 1795), del Phylum dei Mollusca (Linnaeus, 1758), comprende tra le altre, le due sottoclassi Caenogastropoda (Cox, 1960) e Heterobranchia, che a loro volta comprendono i gruppi sistematici considerati. La sottoclasse Caenogastropoda comprende l'ordine Littorinomorpha (Golikov & Starobogatov, 1975), che a sua volta racchiude la famiglia Pterotracheoidea (Rafinesque, 1814). La superfamiglia Pterotracheoidea corrisponde al gruppo degli Heteropoda, ed è suddivisa in tre famiglie: Atlantidae (Rang, 1829), Carinariidae (Blainville, 1818) e Pterotracheidae (Rafinesque, 1814). Questo gruppo sistematico ha sviluppato diversi adattamenti alla vita pelagica, che consistono nella trasformazione dell'originale 'piede' dei gasteropodi in una pinna natatoria verticale e relativamente ampia, nella riduzione dello spessore della parete della conchiglia e nella presenza di occhi sorprendentemente ben sviluppati. Inoltre le parti molli sono prevalentemente trasparenti e di solito mostrano gli organi interni senza sezioni anatomiche (Janssen & Peijnenburg, in stampa). Delle tre famiglie appartenenti alle Pterotracheoidea verrà considerata solamente quella delle Carinariidae, che comprende tre generi: *Cardiapoda* (d'Orbigny, 1834), *Carinaria* (Lamarck, 1801) e *Pterosoma* (Lesson, 1827). Gli organismi appartenenti a tale famiglia possono essere abbastanza grandi, ad esempio *Carinaria cristata* (Linnè, 1767) può raggiungere una lunghezza di 68 cm (Seapy, 2011). Le Carinariidae inoltre presentano conchiglie di spessore molto ridotto. Sia il genere *Carinaria* che *Pterosoma* comprendono organismi adulti dotati di una conchiglia carbonatica vestigiale, che copre solo gli organi viscerali. Essa ha una forma a 'cappuccio' ed è costituita dalla protoconca (residuo della conchiglia larvale) molto piccola e ad avvolgimento sinistrorso e dalla teleoconca (conchiglia adulta) molto ampia e fragile (Janssen & Peijnenburg, in stampa).

La sottoclasse dei Gasteropodi che prende il nome di Heterobranchia è suddivisa in infraclassi, tra cui quella degli Opisthobranchia, che comprende a sua volta l'ordine dei Thecosomata (Blainville, 1824) e quello dei Gymnosomata (Blainville, 1824). Il termine informale di "Pteropodi" viene utilizzato per

designare i molluschi oloplanctonici dell'ordine dei Thecosomata e dei Gymnosomata. I Thecosomata hanno sviluppato degli organi speciali per l'adattamento allo stile di vita planctonico, ma si sono evoluti in maniera differente rispetto agli Pterotracheoidea (Heteropoda). In questo caso l'originale 'piede' dei gasteropodi non si è trasformato in una pinna natatoria, ma evolvendosi ha dato origine a due parapodi o 'ali', che hanno conferito agli pteropodi il nome popolare di 'sea butterfly'.

L'ordine dei Thecosomata è suddiviso in due sottordini: gli Euthecosomata (Meisenheimer, 1905) caratterizzati dalla presenza di un guscio calcareo esterno e gli Pseudothecosomata, che al posto della conchiglia calcarea, possiedono una pseudoconca di natura cartilaginea.

Gli Euthecosomata sono tutti dotati di conchiglia carbonatica esterna e sono suddivisi morfologicamente in due superfamiglie, quella delle Limacinoidea (Gray, 1840) e quelle delle Cavolinoidea (Gray, 1850).

Le Limacinoidea sono caratterizzate da una conchiglia avvolta in una spirale, mentre le Cavolinoidea non hanno la conchiglia avvolta a spirale, ma di forma conica o a simmetria laterale.

Gli Euthecosomata possono essere: epipelagici se vivono a profondità che variano tra 0 e 200 m di profondità, mesopelagici, se vivono tra 200 e 1000 metri di profondità o batipelagici, se vivono a profondità di 1000 metri o superiori. Tali organismi sono in grado di modificare la propria posizione all'interno della colonna d'acqua grazie ad un processo noto come fototassi, che consiste nel movimento degli stessi in funzione dell'intensità della luce solare.

Gli Euthecosomata vivono nella zona eufotica (al di sotto dei 200 m di profondità circa), in condizioni di scarsa luminosità, pertanto mostrano una fototassi negativa perché sono in grado di allontanarsi dalle zone superficiali troppo luminose. La fototassi positiva consiste invece in un movimento dell'organismo verso la sorgente luminosa.

Gli Euthecosomata mostrano una preferenza per le acque calde e temperate, infatti il maggior numero di specie di pteropodi è distribuito in ambienti tropicali e subtropicali, mentre nelle acque fredde si riduce drasticamente la diversità di specie, fino ad arrivare ad un'unica specie vivente nel Mare Artico (*Limacina helicina*). D'altra parte gli pteropodi di acque fredde, pur non avendo un'ampia diversità di specie, si trovano frequentemente in popolazioni dense e

costituiscono, insieme al krill (crostacei della famiglia delle Euphasidae) un'importante componente della catena trofica dei pesci e dei cetacei (Janssen & Peijnenburg, in stampa).

Gli Euthecosomata si nutrono principalmente di microplancton (sia fitoplancton che protozoi), che viene catturato tramite la produzione di catene di muco di dimensioni superiori a quelle degli organismi stessi (Gilmer 1972, 1974; Gilmer e Harbison 1986). Le specie appartenenti a questo gruppo sono ermafrodite proterandriche (Lalli & Wells, 1978), sono in grado cioè di modificare il proprio genere da maschile a femminile nel corso del ciclo vitale.

L'ordine delle Limacinoidea è suddiviso in due famiglie: le Limacinidae (Gray, 1840), la cui conchiglia è avvolta a spirale e le Creseidae (Rampal, 1973), che hanno la conchiglia a forma conica. La prima comprende i tre generi: *Creseis* (Rang, 1828), *Hyalocylis* (Fol, 1875), *Styliola* (Gray, 1847), mentre la seconda comprende due generi: *Heliconoides* (d'Orbigny, 1835) e *Limacina* (Bosc, 1817). L'ordine Cavolinoidea è diviso in tre famiglie: Cuvierinidae (van der Spoel, 1967), Cliidae (Jeffreys, 1869) e Cavolinidae (Gray 1850). Le Cuvierinidae comprendono solamente il genere *Cuvierina* (Boas, 1886), le cui specie sono dotate di conchiglie a forma di bottiglia. Le Cliidae comprendono solamente il genere *Clio* (Linnaeus, 1767), che include le specie dalla caratteristica forma a piramide. La famiglia delle Cavolinidae è suddivisa in tre generi: *Cavolinia* (Abildgaard, 1791), *Diacria* (J. E. Gray, 1840), *Diacavolinia* (van der Spoel, 1987). Le conchiglie delle Cavolinidae hanno una forma globosa e sono costituite da due parti, quella ventrale e quella dorsale, leggermente separate tra loro.

Gli Pseudothecosomata (sottordine dei Thecosomata) comprendono tre famiglie: le Cymbulioidea, le Desmopteridae e le Peraclidae. Le Desmopteridae e le Peraclidae sono rappresentate da un solo genere, rispettivamente *Desmopterus* e *Peraclis*, mentre le Cymbulioidea comprendono tre generi: *Cymbulia* (Péron & Lesueur, 1810), *Gleba* (Forskål, 1776) e *Corolla* (Dall, 1871).

Gli Pseudothecosomata (ordine Thecosomata) differiscono anatomicamente rispetto agli Euthecosomata, poichè hanno sviluppato degli adattamenti diversi alla vita pelagica rispetto ad essi.

L'adattamento principale degli Pseudothecosomata è la trasformazione della conchiglia carbonatica in una pseudoconca cartilaginea, più leggera rispetto alla conchiglia vera e propria. Un altro adattamento consiste nella trasformazione

dell'originale 'piede' dei gasteropodi in organo costituito da una proboscide e dalle ali, che sono fuse insieme in un disco natatorio, mentre negli Euthecosomata sono separate tra loro (van der Spoel, 1976).

Gli Pseudothecosomata, durante la fase larvale, sono tutti dotati di conchiglia carbonatica, che, nella fase adulta (nella maggior parte dei casi) si trasforma in una pseudoconca. Le dimensioni della pseudoconca possono variare all'interno dei diversi generi, in particolare essa è molto grande nel genere *Cymbulia*, mentre in *Gleba* e *Corolla* è di dimensioni molto ridotte, fino a scomparire completamente nelle Desmopteridae. L'unico caso in cui la conchiglia carbonatica è presente anche nella fase adulta, è rappresentato dal genere *Peraclis*.

I Gymnosomata sono un gruppo di pteropodi noti con il nome di '*sea-angels*', per la caratteristica assenza di conchiglia carbonatica nella fase adulta. Tale ordine comprende organismi molto diversi rispetto ai Thecosomata e per questo motivo sono considerati sistematicamente distanti.

I Gymnosomata vivono in oceano aperto in acque piuttosto profonde e possono essere campionati solamente tramite il *trawling* per il plancton. La loro preservazione è difficile poiché le specie vive tendono a deformarsi fortemente quando vengono portate in superficie, pertanto anche la loro conservazione in alcool non permette l'osservazione delle caratteristiche originarie dell'individuo.

In questo studio non sono stati considerati né i Gymnosomata né gli Pseudothecosomata, poiché non avendo una conchiglia carbonatica, non possono lasciare tracce nel record geologico.

3.2 Sistematica delle specie considerate

In questo paragrafo sono state descritte le specie di Euthecosomata e di Pterotracheoidea ritrovate all'interno dei campioni analizzati. La classificazione sistematica è stata fatta sulla base delle informazioni reperite sul sito web *World Register of Marine Species* (WoRMS; www.marinespecies.org), mentre è stato tralasciato l'elenco completo delle sinonimie delle singole specie, pertanto per una revisione aggiornata delle stesse si rimanda al recente lavoro di Janssen (2012).

Le descrizioni tassonomiche fanno riferimento ai lavori di van der Spoel (1967, 1976), Di Geronimo (1970), Thriot-Quévèreux (1975), van der Spoel & Dadon (1997) e il sito web (species-identification.org) *Marine Species Identification Portal* (MSIP).

Phylum MOLLUSCA Linnaeus, 1758

Classis GASTROPODA Cuvier, 1795

Subclassis CAENOGASTROPODA Cox, 1960

Ordo LITTORINIMORPHA Golikov & Starobogatov, 1975

Superfamilia PTEROTRACHEOIDEA Rafinesque, 1814

(= ‘Heteropoda’)

Familia CARINARIIDAE Blainville, 1818

Genus CARINARIA Lamarck, 1801

Carinaria lamarckii Blainville, 1817

Descrizione

La conchiglia è trasparente ed è estremamente fragile e sottile. La sua forma “a cappuccio”, è compressa lateralmente, ed è più ampia verso la base della conchiglia e più stretta all’apice, in corrispondenza della porzione chiamata protoconca. La conchiglia copre solo il nucleo viscerale, mentre il resto del corpo, considerevolmente più lungo rispetto alla conchiglia, non può mai ritirarsi al suo interno. Gli adulti di *Carinaria lamarckii* hanno una conchiglia completamente diversa da quella delle larve, sia come forma che come funzione: la conchiglia embrionale può contenere al suo interno tutte le parti molli dell’organismo, mentre la conchiglia adulta ricopre solo il nucleo viscerale e può essere considerata una rimanenza vestigiale. Gli adulti di *Carinaria lamarckii*, così come gli adulti dei Thecosomata, conservano la conchiglia embrionale o protoconca, che è distinta dalla teleoconca, la porzione della conchiglia che caratterizza la fase adulta. La protoconca di *C. lamarckii* mostra un ripiegamento ad elica planare ed è costituita da 4 giri di spirale, mentre la teleoconca inizia con un forte allargamento del quarto giro di spirale ed è costituita da piani sovrapposti di forma triangolare. La conchiglia è ornata da una serie di linee di accrescimento trasversali, che si allargano verso la base della conchiglia. La superficie anteriore

convessa è caratterizzata da una sottile carena, che percorre tutta la linea mediana della superficie stessa. La carena, costituita da due piastre molto ravvicinate, è divisa in segmenti dell'estensione delle linee di accrescimento presenti sul corpo principale della conchiglia. Il corpo di *Carinaria lamarckii* è lungo al massimo 22 cm, è allungato e di forma cilindrica ed è caratterizzato dalla presenza di una pinna natatoria dorsale, dalla parte opposta rispetto al nucleo viscerale e posizionata circa a metà della lunghezza del gasteropode. Il corpo è quasi del tutto trasparente, ad eccezione del nucleo viscerale, che è di colore scuro e si intravede attraverso la conchiglia calcarea (che è trasparente; Fig. 4). Il gasteropode è ricoperto da un'epidermide spessa, che mostra delle papille coniche sulla superficie. Sulla parte anteriore della testa sono presenti la proboscide e due tentacoli.

Le larve di *C. lamarckii* hanno una conchiglia completamente diversa da quella degli adulti. La conchiglia larvale è piccola ed è avvolta in una spirale planare destrorsa. Gli adulti conservano parte della conchiglia embrionale nella protoconca. La conchiglia larvale è elicoidale, trasparente nella maggior parte dei casi e, in qualche individuo, presenta una sfumatura leggermente ambrata. La forma generale è globosa, l'apertura è arrotondata e a livello dell'ombelico si osserva qualche striatura. L'opercolo è arrotondato e mostra una chiara spirale con linee di accrescimento. I giri della spirale sono bombati e all'apice c'è un piccolo rilievo. La larghezza dell'ultimo giro della spirale, a livello dell'apertura, è uguale a un terzo del diametro totale. Quando la larva raggiunge lo stadio della metamorfosi, la conchiglia misura circa 1 mm di diametro per 4 giri di spirale e un quarto.

Carinaria lamarckii è una specie fitofaga, che si nutre di fitoplancton, ed epipelagica.

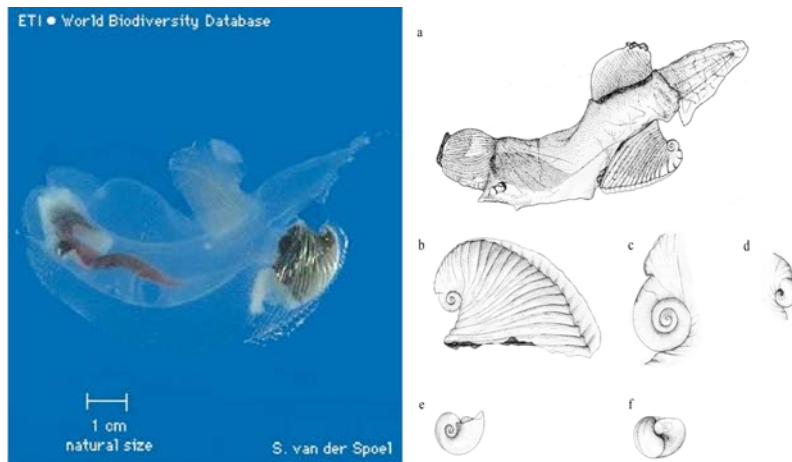


Fig. 4. Sulla sinistra esemplare adulto di *C. lamarkii*, si può notare il sacco viscerale contenuto all'interno della conchiglia vestigiale e il corpo dell'organismo. (da species-identification.org). Sulla destra disegno della stessa specie a. vista laterale dell'animale, b. conchiglia adulta dal lato apicale, c. protoconca dal lato apicale, d. proto conca dal lato ombelicale, e. conchiglia larvale dal lato apicale, f. conchiglia larvale dal lato ombelicale

Distribuzione

C. lamarkii è una specie cosmopolita con un ampio intervallo di distribuzione (Fig. 5) che va da 60°N a 45°S. Tale specie raggiunge il massimo di abbondanza nel mar dei Caraibi presso le Piccole Antille (Tesch, 1949). Solo pochi dati sono disponibili per oceano Indo-Pacifico (MSIP). Nel Mediterraneo è comune, ma non abbondante.

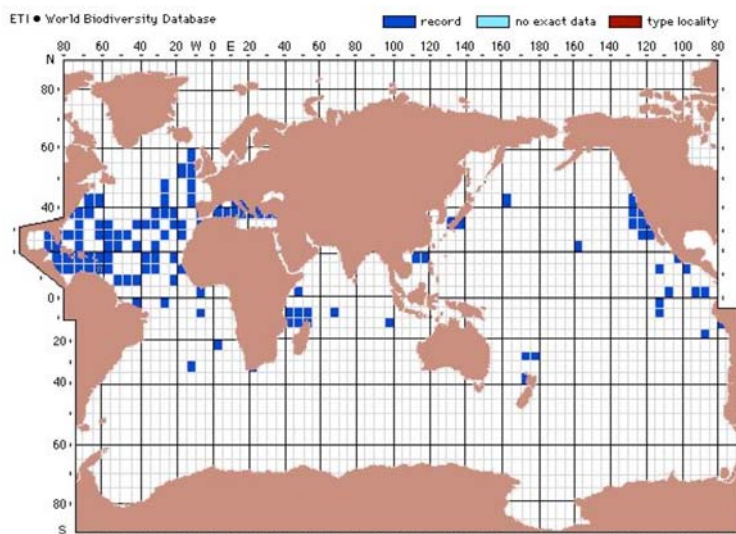


Fig. 5. Distribuzione di *C. lamarkii*, si può notare l'abbondanza di segnalazioni

nella fascia temperata della provincia atlantica e mediterranea e i ritrovamenti sporadici negli altri oceani. (da species-identification.org).

Phylum MOLLUSCA Linnaeus, 1758

Classis GASTROPODA Cuvier, 1975

Subclassis HETEROBRANCHIA

Infraclassis OPISTHOBRANCHIA

Ordo THECOSOMATA Blainville, 1824

Subordo EUTHECOSOMATA Meisenheimer, 1905

Superfamilia LIMACINOIDEA Gray, 1840

Familia LIMACINIDAE Gray, 1840

La conchiglia è avvolta in una spirale sinistrorsa, con l'opercolo e la cavità del matello è sul lato dorsale. La famiglia comprende un unico genere.

Genus LIMACINA Bosc, 1817

Limacina retroversa Fleming, 1823

Limacina retroversa Fleming, 1823

f. *retroversa* Fleming, 1823

Descrizione

La conchiglia è avvolta a spirale ed è generalmente costituita da 5 giri. L'ultimo giro di spirale è ampio e occupa circa 2/5 della lunghezza totale della conchiglia (Fig. 6). L'apertura della conchiglia non è molto larga e il suo bordo è irregolarmente arrotondato. L'ombelico è stretto ma profondo. L'ultimo giro di spirale è caratterizzato da una leggera striatura formata da piccoli punti. L'altezza della conchiglia è di 2.5 mm, il diametro massimo è di 3 mm, mentre la media del diametro massimo misura 2.6 mm.

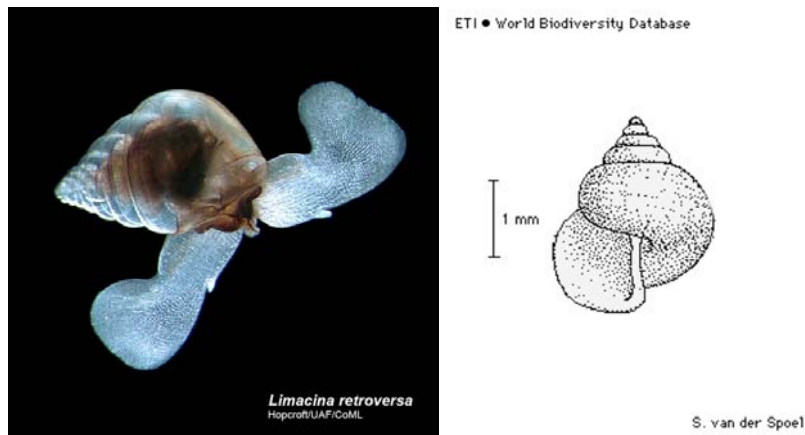


Fig. 6. *L. retroversa* f. *retroversa*, sulla sinistra foto che mostra le parti molli dell'organismo (da <http://www.arcodiv.org>), sulla destra rappresentazione schematica della conchiglia (da species-identification.org).

Distribuzione

La f. *retroversa* è una specie tipica di acque fredde, la sua distribuzione occupa una piccola area nel Nord Atlantico. Nel Mediterraneo *L. retroversa* f. *retroversa* è segnalata nel bacino occidentale ed è probabilmente composta da individui provenienti dall'Atlantico, mentre per il bacino levantino le segnalazioni sono molto scarse (Fig. 7).

L. retroversa f. *retroversa* è segnalata a partire dal Pleistocene per il bacino Mediterraneo e in particolare l'Adriatico; in quest'ultimo è estinta alla fine dello Younger Dryas.

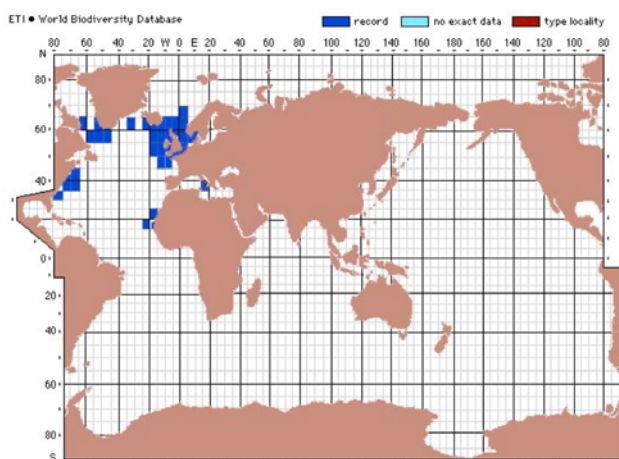


Fig. 7. Distribuzione di *L. retroversa* f. *retroversa*, si può notare l'abbondanza di segnalazioni nella fascia temperato-fredda della provincia atlantica. (da species-identification.org).

Superfamilia CAVOLINIOIDEA J. E. Gray, 1850

Familia CUVIERINIDAE van der Spoel, 1967

Genus CUVIERINA Boas, 1886

Cuvierina atlantica Bé, MacClintock & Currie, 1972

Descrizione

La conchiglia è completamente trasparente, è a forma di bottiglia e si restringe al di sotto dell'apertura a forma di rene. La superficie è liscia oppure presenta linee di accrescimento poco visibili. Negli individui giovani è presente una spina caudale molto allungata, che è assente negli adulti. La maggiore ampiezza si trova a un terzo della lunghezza a partire dalla base. La conchiglia embrionale è presente solo negli esemplari giovanili ed è costituita da una parte a forma conica e una a forma ovale (Fig. 8). Quando inizia a formarsi il setto caudale convesso, tipico degli adulti, la protoconca si distacca dalla teleoconca (dal resto della conchiglia), il muscolo columellare si attacca vicino al setto e l'individuo raggiunge le sue dimensioni finali. Solo in casi eccezionali la protoconca resta attaccata alla teleoconca anche in fase adulta. La lunghezza della conchiglia varia tra 7 e 10 mm.

Cuvierina atlantica è una specie onnivora oppure fitofaga ed epipelagica. Si sposta orizzontalmente con una velocità di 4.0 mm/s e verso l'alto con una velocità di 30.2 mm/s, mentre la velocità di affondamento è di 62.5 mm/s (Davenport & Bebbington, 1990).



Fig. 8. A sinistra esemplare adulto di *C. atlantica* (da species-identification.org); sulla destra rappresentazione schematica del guscio.

Distribuzione

Cuvierina atlantica è una specie ristretta alle acque calde dell'oceano Atlantico, la località tipo è quella del mar dei Caraibi. La corrente del Golfo può trasportare accidentalmente degli esemplari verso nord, questo fatto spiega il ritrovamento di tale specie a sud dell'Islanda (Fig. 9).

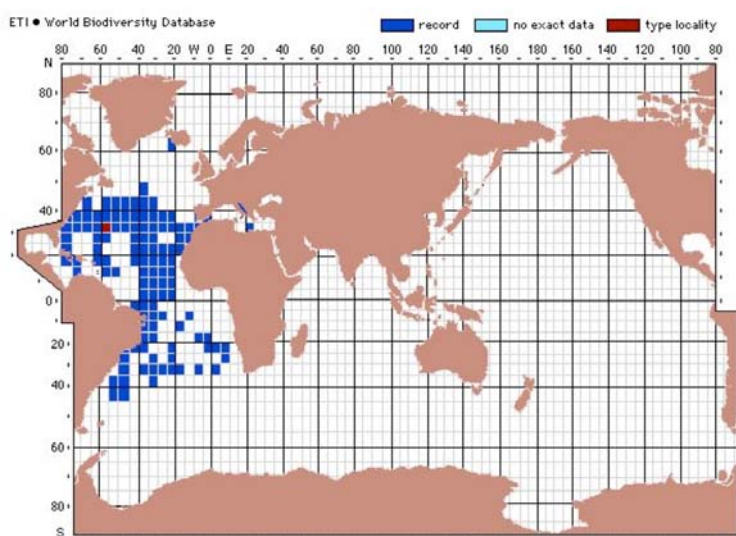


Fig. 9. Distribuzione di *C. atlantica*, si può notare l'abbondanza di segnalazioni nella fascia temperata della provincia atlantica e alcuni ritrovamenti sporadici a sud dell'Islanda e all'interno del Mar Mediterraneo. (da species-identification.org).

Familia CLIIDAE Jeffreys, 1869

Genus CLIO Linnaeus, 1767

La conchiglia ha una forma piramidale, l'apertura è appiattita o triangolare, le striature trasversali sono leggermente accennate o assenti, gran parte delle specie mostra una lieve differenziazione dorso-ventrale (van der Spoel & Dadon, 1999).

Clio cuspidata (Bosc, 1802)

Descrizione

La conchiglia, come quella delle altre specie appartenenti alla famiglia delle Cliidae, non è avvolta su se stessa ed è a forma di piramide, è ialina e trasparente ed è distintamente curvata dorsalmente. Il lato dorsale è caratterizzato da una stretta piega mediana longitudinale, che inizia poco sopra la parte embrionale e si

prolunga come una spina oltre il bordo dell'apertura, con una lunghezza equivalente a circa 1/6 del totale. In prossimità dell'apertura della conchiglia, il lato dorsale sporge sopra quello ventrale. Oltre alla piega dorsale sono presenti delle protuberanze laterali, anch'esse a forma di spina. La superficie ventrale è regolarmente arrotondata ed è segnata da una grande piega centrale longitudinale, che si allarga verso la parte anteriore della conchiglia. I lati dorso-ventrali sono solcati da sottilissime linee di accrescimento trasversali ben sviluppate, in particolare sul lato dorsale. La sezione trasversale della conchiglia ha una forma triangolare, leggermente arrotondata in corrispondenza delle parti laterali. L'ampiezza maggiore della conchiglia è data dalla linea che congiunge idealmente la punta delle spine laterali e si trova circa a metà o al di sotto della linea longitudinale che attraversa l'intera conchiglia. La parte terminale della conchiglia embrionale negli adulti è costituita da una cuspidi smussata e quasi sferica, mentre nella conchiglia embrionale degli esemplari giovanili la cuspidi è appuntita e non ancora consumata dall'usura. La conchiglia ha mediamente una lunghezza di circa 20 mm e un'ampiezza di 30 mm (Fig. 10 e 11).

Clio cuspidata è una specie fitofaga ed epipelagica, che vive in un intervallo di temperatura compreso tra 15.3° e 23°C. Tale specie è nota fin dal Pleistocene nel Mediterraneo.

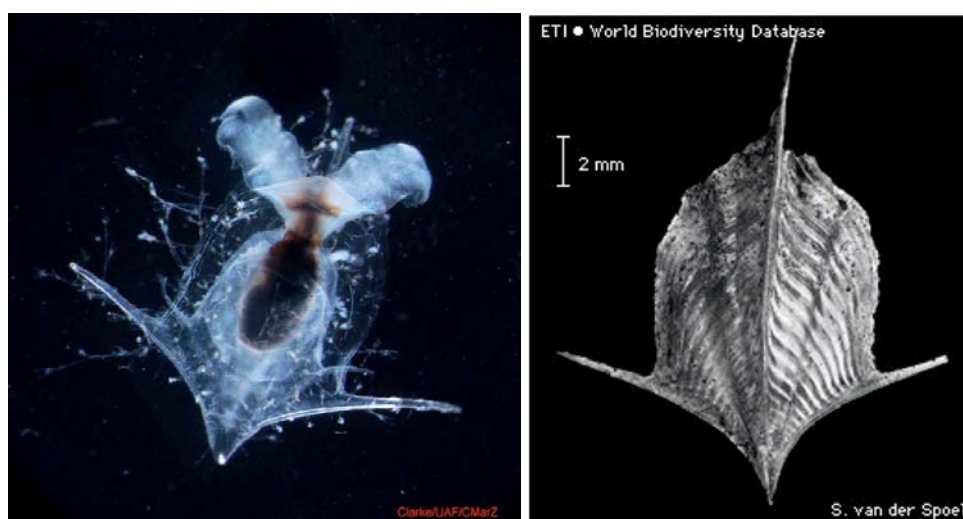


Fig. 10. Sulla sinistra esemplare adulto di *C. cuspidata* (da <http://www.cmarz.org>); sulla destra foto di un guscio di esemplare adulto (da species-identification.org).

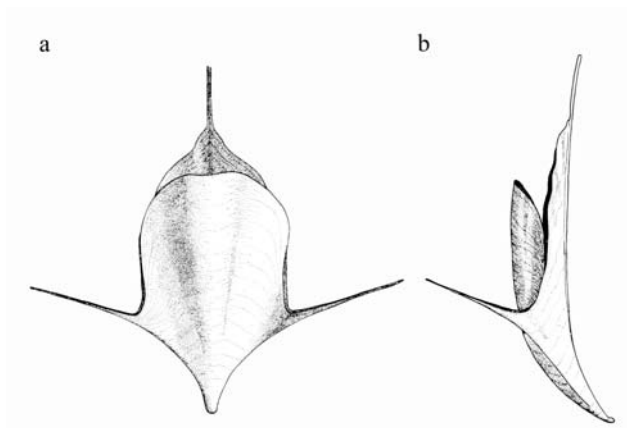


Figura 11. Disegno del guscio di *C. cuspidata* a. vista ventrale, b. vista laterale (da Van der Spoel, 1976)

Distribuzione

Clio cuspidata è una specie di acque calde e la sua distribuzione dimostra le differenze tra le masse d'acqua, in particolare tra l'Oceano Atlantico orientale e occidentale (Fig. 12). Nell'Atlantico occidentale la specie copre solo una piccola area situata tra 15°N e 40°S, mentre nell'Atlantico orientale si trova tra 65° N e 20° S. *Clio cuspidata* risente dell'influenza della corrente del Golfo, infatti la sua presenza al di sopra della latitudine di 50° N dipende dall'azione mitigante della corrente. Nella parte meridionale dell'Atlantico orientale, è evidente l'influenza della corrente del Benguela, che trasporta la specie molto a nord.

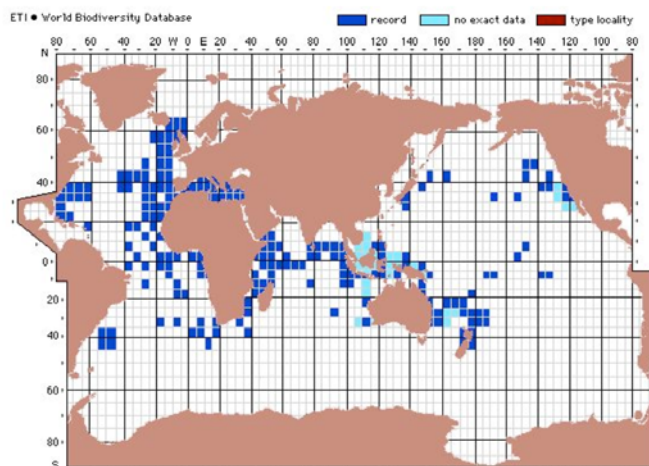


Fig. 12. Distribuzione di *C. cuspidata*, si può notare l'abbondanza di segnalazioni nella fascia temperata e tropicale di questa specie quasi cosmopolita. (da species-identification.org).

Clio pyramidata Linnaeus 1767

La specie *Clio pyramidata* racchiude differenti forme con anatomia simile e variazioni graduali nella forma della conchiglia.

Le diverse forme hanno tratti morfologici simili, come la forma ‘a pera’ della conchiglia embrionale, la sezione trasversale che è tondeggiante vicino all’apice e diventa sempre più triangolare man mano che ci si avvicina all’apertura della conchiglia, la presenza di una costola longitudinale sul lato ventrale della conchiglia e di alcune striature sul lato dorsale. Tali striature appaiono solo a una certa distanza dall’apice della conchiglia, le striature laterali del lato ventrale sono assenti solitamente vicino all’apice, l’ampiezza massima della conchiglia si trova sempre all’apertura.

Le diverse forme hanno andamenti distributivi più o meno diversi, ma sono geograficamente collegate l’una all’altra, in questo modo *C. pyramidata* presenta una distribuzione continua da un polo all’altro. Ciò suggerisce che si tratta di specie politipiche alla quale appartengono le forme: *pyramidata*, *lanceolata*, *convexa*, *martensii*, *excisa*, *sulcata* e *antarctica*.

L’unica forma ritrovata nel Mediterraneo è la forma *lanceolata*, che verrà descritta qui di seguito.

Clio pyramidata Linnaeus 1767

f. *lanceolata* Lesueur, 1813

Descrizione

La conchiglia è molto sottile, incolore e completamente trasparente e ha la forma della punta di una lancia. Il lato dorsale è fortemente convesso ed è ornato da tre pieghe longitudinali, tra le quali quella mediana è molto accentuata e sporge distintamente oltre l’apertura della conchiglia. Il lato ventrale è leggermente concavo ed è attraversato da una piega longitudinale mediana che corrisponde a quella dorsale. Le pieghe longitudinali sono più accentuate nella parte anteriore della conchiglia e vanno a scomparire verso la parte posteriore. I due lati si uniscono lateralmente a formare due carene ispessite e allungate, che si inclinano verso il piano ventrale. La sezione trasversale della conchiglia è arrotondata vicino all’apice posteriore, è triangolare a metà della lunghezza e anteriormente

assume una forma a luna. Sia il lato ventrale che quello dorsale sono attraversati da striature trasversali poco pronunciate, che sono distinte dalle sottilissime e ben visibili linee di accrescimento. L'ampiezza maggiore della conchiglia è circa a metà, in corrispondenza della parte terminale delle protuberanze laterali. La conchiglia embrionale è piuttosto allungata rispetto alle altre forme di *C. pyramidata*. La lunghezza della conchiglia è di circa 20 mm, lo spessore massimo è di 15 mm (Fig. 13).

La specie è onnivora o fitofaga, e può essere epipelagica o mesopelagica. La specie mostra infatti elevate velocità di migrazione verticale diurna tra 0 e 1000 metri. Gli individui giovanili si trovano 50-200 metri sotto gli adulti. La specie è in grado di vivere in un intervallo di temperatura che varia tra 7° e 27.8°C e in un intervallo di salinità compreso tra 36.1 e 36.5 ‰. La velocità di spostamento orizzontale è di 40.1 mm/s, la velocità di spostamento verticale verso l'alto è di 8.2 mm/s, mentre la velocità di affondamento varia tra 33.5 e 40.2 mm/s (Davenport & Bebbington, 1990).

Le esplosioni (*bloom*) di *C. pyramidata* f. *lanceolata* rappresentano un'importante fonte di cibo per pesci e cetacei. La taglia della conchiglia embrionale è stata utilizzata come proxy oceanografico per la stima delle temperature e delle paleotemperature delle masse d'acqua (Diester-Haass & Van der Spoel, 1978).

Questa specie è conosciuta dal Pliocene nel bacino del Mediterraneo e dal tardo Quaternario del Mar Rosso.

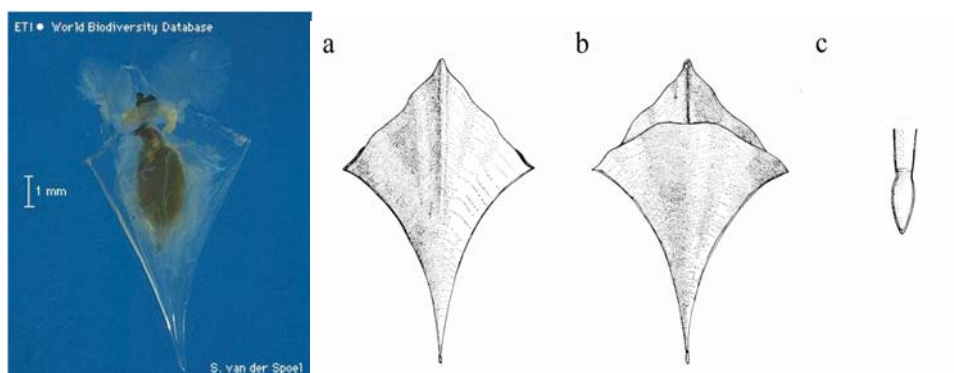


Fig. 13. A sinistra esemplare adulto di *C. pyramidata* f. *lanceolata*. (da species-identification.org). A destra disegno del guscio; a. vista dorsale, b. vista ventrale, c. dettaglio protoconca (da Van der Spoel, 1967).

Distribuzione

C. pyramidata f. *lanceolata* è una specie molto comune nel Mediterraneo ed è l'unica forma di *C. pyramidata* presente nel Mediterraneo (Janssen, 2012). Nel Mar Mediterraneo l'unica forma di *C. pyramidata* presente è quella *lanceolata*. La distribuzione della *Clio pyramidata* f. *pyramidata* è esclusiva dell'Oceano Atlantico settentrionale, perché preferisce acque fredde, mentre la *C. pyramidata* f. *lanceolata* predilige acque più calde, come quelle del Mediterraneo e dei mari temperati (Fig. 14).

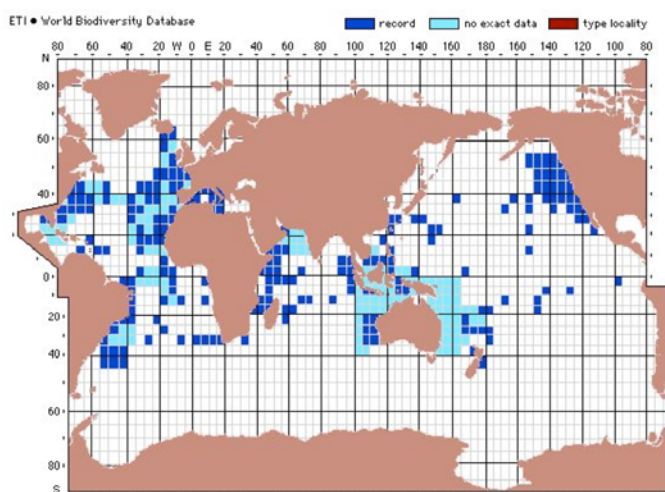


Fig. 14. Distribuzione di *C. pyramidata* f. *lanceolata*, si può notare l'abbondanza di segnalazioni nella fascia temperata e tropicale di questa specie cosmopolita. (da species-identification.org).

Familia CAVOLINIIDAE Gray, 1850

La conchiglia non è avvolta in una spirale, le forme primitive hanno conchiglie tubolari dritte, le forme più evolute hanno conchiglie piramidali o composte da due metà simili a valve; le parti molli mostrano una simmetria bilaterale secondaria, il muscolo columellare è attaccato alla superficie interna della protoconca (van der Spoel & Dadon, 1999).

Genus CAVOLINIA Abilgaard, 1791

I membri di questo genere sono dotate di una conchiglia di forma globosa e non spiralata (van der Spoel & Dadon, 1999).

Cavolinia gibbosa (d'Orbigny, 1834)

Descrizione

La conchiglia ha una forma globulare, dovuta alla larghezza relativamente ampia rispetto alla lunghezza e all'altezza del lato ventrale e termina, nella parte posteriore, con una coda appuntita e inclinata verso il lato dorsale. La conchiglia è sottile e trasparente, con una colorazione porcellanacea sul lato dorsale o talvolta completamente incolore. Il lato dorsale è leggermente ricurvo ed è ricoperto da 5 pieghe longitudinali a forma di clava, che sono più marcate nella posizione anteriore e convergono, in maniera meno accentuata, nella parte posteriore. La piastra ventrale è molto rigonfia ed è ricoperta nella parte anteriore da numerosi solchi trasversali, che convergono nelle spine laterali. Queste ultime sono piuttosto piccole, mentre la spina caudale e il labbro dorsale di apertura sono più pronunciati. La parte anteriore del lato ventrale non si estende longitudinalmente, ma perpendicolarmente all'asse della conchiglia. L'apertura è costituita dalle fessure laterali che si raccordano alla più grande fessura anteriore, che è definita ventralmente da un labbro che sporge leggermente verso l'alto e dorsalmente da un'espansione del lato dorsale piegata ad angolo retto, che si estende sin circa a metà dello spessore di quello ventrale. Lungo le fessure laterali della conchiglia e sul labbro ventrale sono presenti delle strisce sottili brune o rossicce (Fig. 15).

La protoconca I della conchiglia embrionale, di forma ovale e smussata, è ricoperta da numerose e sottili striature trasversali. La protoconca II è ricurva dorsalmente.

La lunghezza massima della conchiglia è di 8 mm, l'ampiezza media corrisponde al 68% della lunghezza (circa 5.5 mm) e lo spessore medio a circa il 71% della lunghezza.

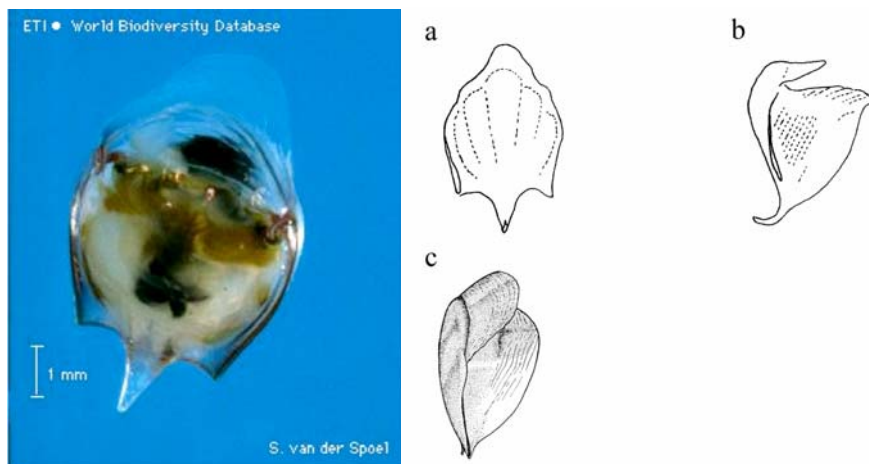


Fig. 15. A sinistra esemplare adulto di *C. gibbosa*; si vedono le parti molli all'interno del guscio dell'organismo che ha guscio ialino trasparente. (da species-identification.org). A destra disegno del guscio di *C. gibbosa*; a. vista dorsale, b. vista laterale (da Janssen, 2012), c. vista laterale obliqua (da Van der spoel, 1967).

Distribuzione

La specie è suddivisa in tre forme e non è possibile considerarle separatamente a causa delle sinonimie che hanno portato a molta confusione. Secondo Janssen (2012) la forma *plana* e *gibbosa* sono ampiamente diffuse nell'Oceano Atlantico e nel Mar Mediterraneo, mentre la forma *flava* è caratteristica della provincia Indopacifica (Fig. 16).

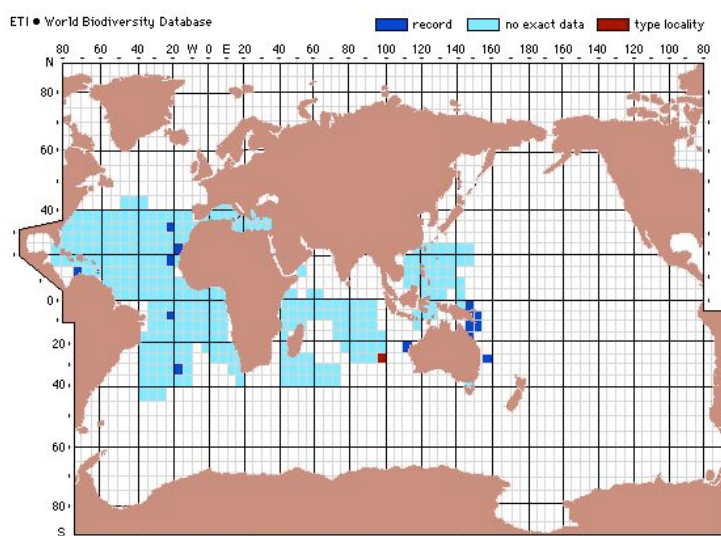


Fig. 16. Distribuzione di *Cavolinia gibbosa*. (da species-identification.org).

Cavolinia inflexa (Lesueur, 1813)

f. *imitans* (Pfeffer, 1880)

Descrizione

La conchiglia è trasparente, allungata e compressa dorso-ventralmente. La porzione caudale è abbastanza larga e non molto allungata, non è separata dal resto della conchiglia ed è fortemente curvata verso il lato dorsale. La conchiglia è ialina con, a volte, qualche chiazza marrone o rosa. Il lato dorsale è quasi completamente piatto, curva posteriormente, non presenta delle pieghe longitudinali, ma solo cinque deboli ondulazioni vicino al labbro ventrale; inoltre è caratterizzato da un'espansione del lato dorsale, o labbro dorsale. Il lato ventrale è leggermente convesso e non presenta pieghe longitudinali né quelle trasversali. Le strie di accrescimento sono chiaramente visibili sul lato ventrale e dorsale. La maggiore ampiezza si trova tra le spine laterali, che si estroflettono circa a metà della conchiglia. Il labbro superiore dorsale non è separato dal lato dorsale, è abbastanza largo, e finisce troncato, in modo da sembrare tagliato, spesso il suo bordo è finemente dentato. La piccola calotta del lato ventrale termina con un solco trasversale sotto il labbro ventrale, che è piegato a sua volta. L'apertura è piccola e non si allarga molto verso la parte posteriore. Il meccanismo di chiusura, presente sull'apertura della conchiglia, non è marcato da un rigonfiamento sul lato dorsale, come nella altre specie di Cavoliniidae. Le spine laterali sono ben sviluppate e leggermente rivolte verso la parte caudale. La conchiglia embrionale è conica, arcuata e ricoperta da sottilissime strie di accrescimento, in alcuni adulti è assente, ma in questi ultimi la porzione terminale è chiusa da un callo che assomiglia alla conchiglia embrionale vera (Fig. 17).

La conchiglia può raggiungere la lunghezza di 8 mm.

La specie è fitofaga ed epipelagica.

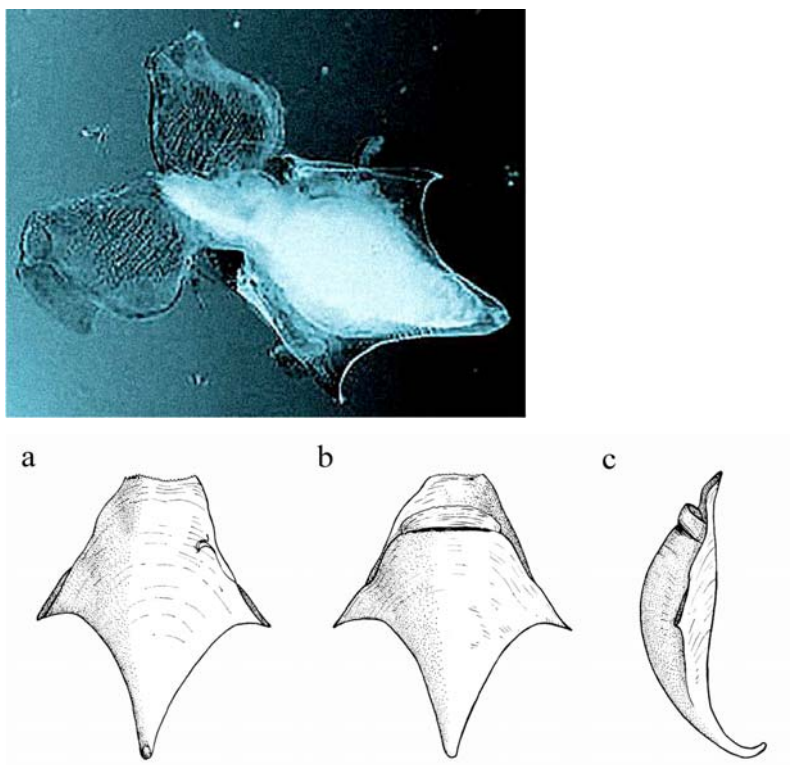


Fig. 17. In alto, esemplare adulto di *C. inflexa* f. *imitans*; in basso rappresentazione del guscio e dei suoi caratteri principali; a. vista dorsale, b. vista ventrale, c. vista laterale (da Van der Spoel 1967).

Distribuzione

C. inflexa è una specie comune di pteropodi, con una distribuzione pressoché globale (Fig. 18).

Tale specie presenta diverse forme, tra cui f. *inflexa*, f. *imitans* e f. *labiata*. Nel Mediterraneo l'unica specie ritrovata è *C. inflexa* f. *imitans*, anche se mostra una considerevole variabilità nello sviluppo delle spine laterali (Janssen, 2012).

La specie *C. inflexa* f. *longa* è stata ritrovata nei sedimenti post-glaciali del bacino Levantino e in simili intervalli nello Ionio (Herman, 1971 a, b).

Herman (1981) ha interpretato *C. inflexa* come una specie di acqua temperata, raggiungendo picchi di abbondanza nel bacino occidentale e basse distribuzioni nel Tirreno centrale e Adriatico, diventando rara nello Ionio e nell'Egeo.

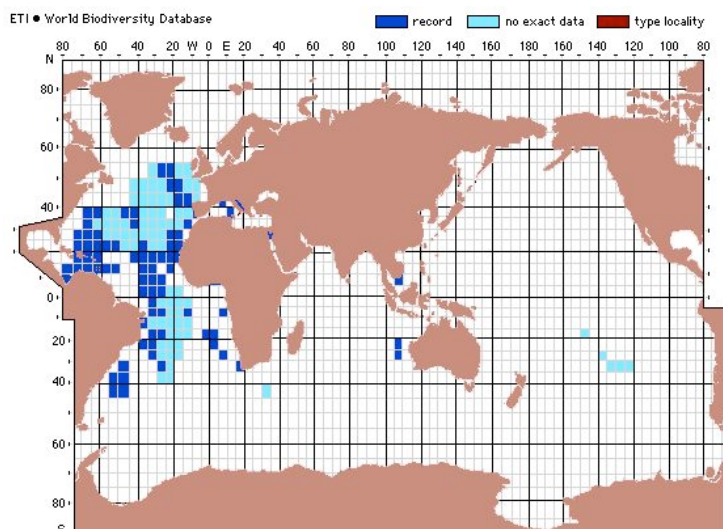


Fig. 18. Distribuzione di *C. inflexa* f. *imitans*. (da species-identification.org).

Cavolinia tridentata (Forskål, 1775)

Descrizione

La conchiglia è robusta, semitrasparente e di colore marrone chiaro, più scuro nella parte posteriore del guscio e lungo le fessure trasversali. La sua forma è globulare e termina posteriormente con una coda appuntita dritta o un po' curva dorsalmente. Il lato ventrale è molto più arrotondato rispetto al lato dorsale ed è caratterizzato dalla presenza di un rigonfiamento accentuato nella porzione anteriore e ricoperto da numerose e sottili striature trasversali, che termina con una piccola depressione anteriore e prosegue con il labbro ventrale. Il lato dorsale è quasi piatto e presenta delle deboli pieghe longitudinali, che sfumano gradualmente verso la parte caudale; la striatura trasversale è assente, eccetto per la presenza di sottili linee di accrescimento. La spina caudale, corta e dritta, è sempre presente negli adulti, ma la conchiglia embrionale è assente

.Le spine laterali sono poco sviluppate e leggermente rivolte verso la parte posteriore. Il labbro dorsale, di forma triangolare più o meno arrotondata al vertice, è separato dal lato dorsale da una chiara protuberanza trasversale e presenta linee di accrescimento. Sia il labbro ventrale che quello dorsale sono leggermente curvati ventralmente e non sono mai ispessiti. L'apertura è costituita dall'accostamento delle due labbra e dalle fessure laterali. La lunghezza della conchiglia è compresa tra 9 e 20 mm (Fig. 19). *C. tridentata* è specie fitofaga ed è

una specie conosciuta per il Pleistocene nel bacino Mediterraneo e sin dal Pliocene per la penisola italiana.

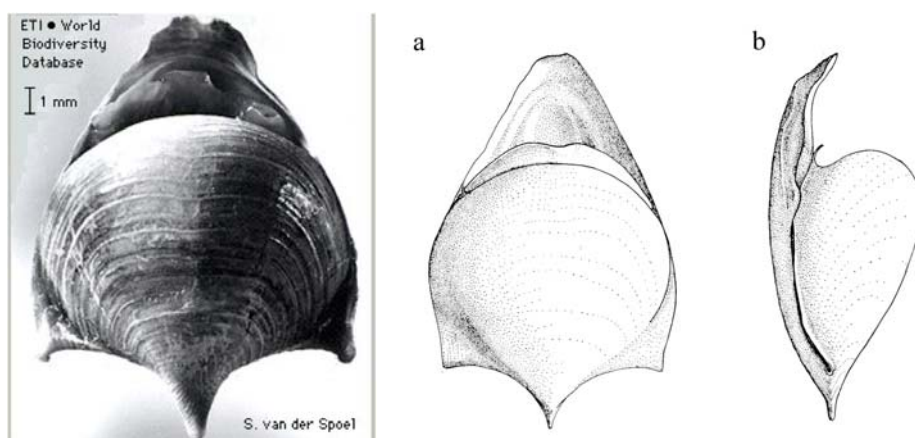


Fig. 19. Immagine a sinistra guscio di *Cavolinia tridentata* f. *tridentata*; a destra disegno schematico che ne mette in evidenza le caratteristiche principali. a. vista ventrale, b. laterale (da Van der Spoel, 1967)

Distribuzione

È una specie a distribuzione strettamente mediterranea (Fig. 20).

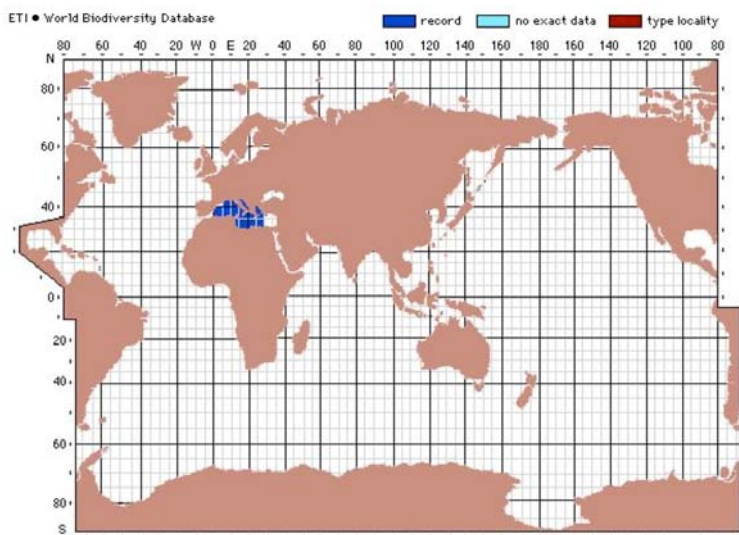


Fig. 20. Distribuzione di *Cavolinia tridentata*, si può notare che la specie è presente solo nel Mediterraneo (da species-identification.org).

Genus DIACRIA Gray, 1840

Le specie appartenenti a questo genere abbandonano la protoconca e formano un setto di chiusura (van der Spoel & Dadon, 1999).

Diacria trispinosa (Blainville, 1821)

Descrizione

La conchiglia è molto compressa dorso-ventralmente e presenta un'apertura lunga a fessura, che, a differenza delle *Cavoliniidae*, è continua e non separata da un meccanismo di chiusura. La conchiglia è leggermente trasparente ed è di color nocciola in prossimità del bordo dell'apertura, lungo le fessure laterali e all'apice delle pieghe longitudinali. Il lato dorsale della conchiglia, sebbene sia lievemente arrotondato, è comunque meno rigonfio del lato ventrale. Sul lato ventrale sono presenti tre pieghe longitudinali, mentre sul lato dorsale ce ne sono cinque. Il bordo dell'apertura dorsale si sporge sopra il lato ventrale, mentre il bordo ventrale si piega verso l'esterno del lato ventrale. Entrambi i bordi dell'apertura sono ispessiti, in particolar modo quello dorsale. Le spine laterali sono lunghe estensioni delle fessure laterali e sono orientate perpendicolarmente all'asse della conchiglia. La spina caudale è molto allungata ed è caratterizzata da una conchiglia embrionale molto arrotondata. Le dimensioni della conchiglia arrivano a 12 mm di lunghezza e 11 mm di larghezza (Fig. 21).

La f. *trispinosa* è fitofaga e vive nella zona da epipelagica a mesopelagica con una distinta migrazione verticale. La zona migrazione verticale diurna degli adulti è compresa tra 0 e 500 m. La specie nuota con due ali e si affonda quando ritrae le ali.

D. trispinosa f. *trispinosa* è nota fin dal Tardo Quaternario (tardo interglaciale: 100000 anni BP) del Mar Rosso, e nel Pleistocene del Mediterraneo e nell'Adriatico. Dall'Adriatico tale forma è scomparsa nell'Atlantico. È penetrata nell'Adriatico già nell'*Older Dryas*.

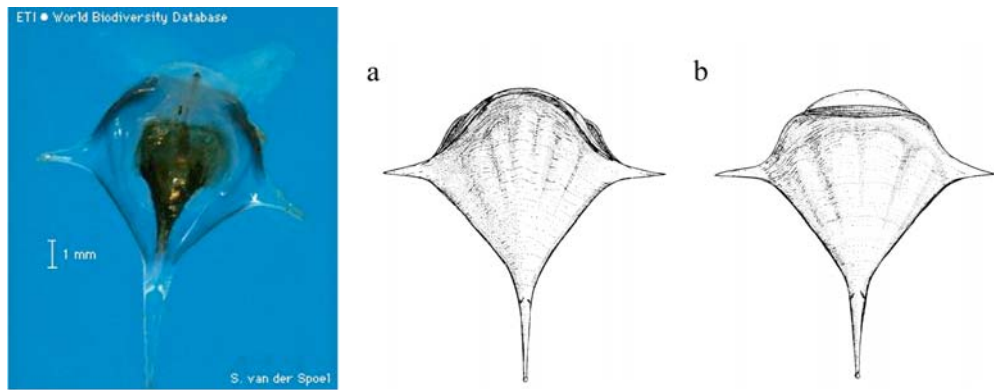


Fig. 21. Sinistra: esemplare vivo di *D. trispinosa* f. *trispinosa*. (da species-identification.org). A destra disegno del guscio della stessa specie; a. vista dorsale, b. vista ventrale.

Distribuzione

D. trispinosa f. *trispinosa* è una specie cosmopolita ed è distribuita da 40°N a 40°S (Fig. 22).

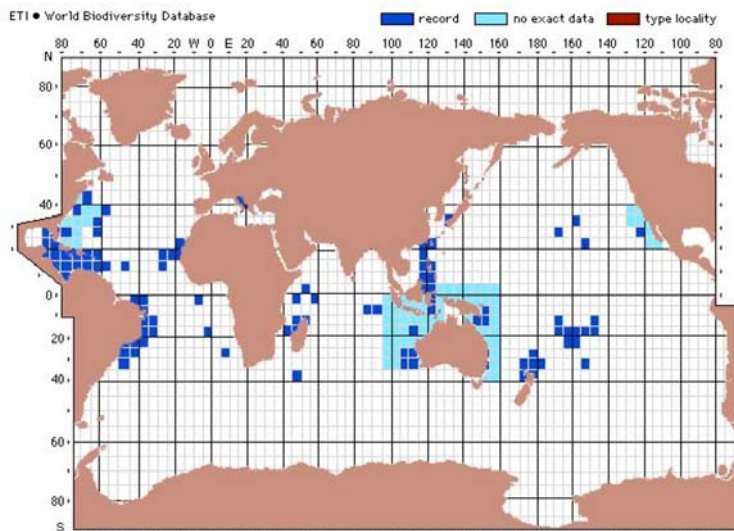


Fig. 22. Distribuzione di *D. trispinosa* f. *trispinosa*

4. RISULTATI E DISCUSSIONI

Nella prima parte di questo capitolo sono descritti e classificati gli esemplari selezionati all'interno dei campioni J73-17 e T74-65, provenienti rispettivamente dal bacino del Mar Ionio e da quello del Mar Tirreno. Dal primo campione sono stati prelevati esemplari appartenenti a specie diverse, in diverso stato di conservazione, mentre all'interno del secondo campione sono stati selezionati esclusivamente esemplari di *Clio pyramidata*.

La seconda parte del capitolo riguarda invece un'analisi di maggior dettaglio, tramite il microscopio a scansione, effettuata sugli esemplari appartenenti ad un'unica specie (*Clio pyramidata*).

4.1.1 Descrizione dei campioni analizzati

Carinaria lamarkii

J73-17_1

L'esemplare è costituito dal solo modello interno che riproduce abbastanza bene la forma 'a cappuccio' della conchiglia (Fig. 23). Si vedono bene le pieghe laterali. Sui due lati dell'esemplare si vedono delle incrostazioni bianche carbonatiche. La base del modello interno sembra costituita da materiale più grossolano.

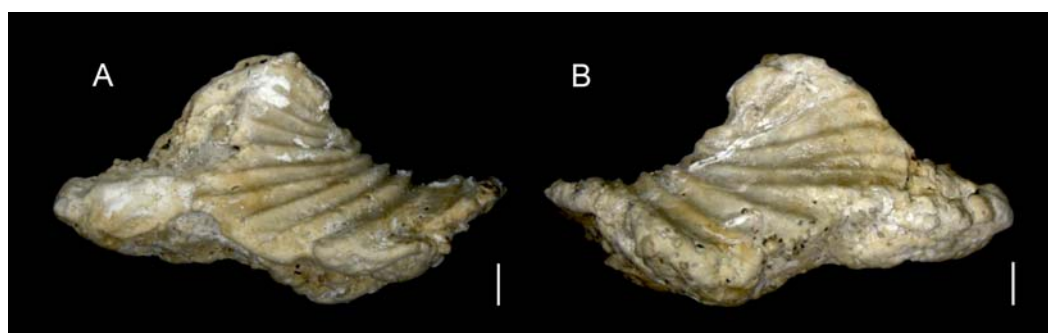


Fig. 23. Modello interno di *C. lamarkii*, la barretta equivale ad 1 mm.

Cuvierina atlantica

J73-17_1

L'esemplare J73-17_1 è piuttosto ben conservato, si vedono i dettagli dell'apertura e della base, dove originariamente era presente la spina caudale. Il modello interno è costituito da un sedimento consolidato piuttosto fine (micrite) e omogeneo (Fig. 24A).



Fig. 24. Modelli interni di *C. atlantica* in diverso stato di conservazione; la barretta equivale a 1 mm.

J73-17_2

L'esemplare J73-17_2 è riconoscibile per la caratteristica forma a bottiglia di questa specie, ma è scarsamente preservato a causa di evidenti segni di bioerosione. Il modello interno, micritico, è di colore chiaro con tracce di ossidi ferrosi evidenti dalla presenza di macchie di colore rosso (Fig. 24B-D).

J73-17_3

L'esemplare J73-17_3 è costituito da un modello interno di colore grigio scuro ed è ricoperto da patine biancastre. Il fianco della *C. atlantica* è attraversato da una crepa parzialmente riempita da un sedimento più grossolano (Fig. 24E-H).

Clio cuspidata

J73-17_1

L'esemplare J73-17_1 è rappresentato dal solo modello interno, con macchie biancastre sulla piastra dorsale, in corrispondenza delle striature laterali oblique. La piega ventrale è molto accentuata. Le spine laterali non si sono conservate oppure non sono state ben riprodotte durante la fase di riempimento della conchiglia. La superficie è molto levigata e di colore scuro. La piastra ventrale riproduce in modo molto grossolano la superficie interna della conchiglia, mentre la piastra dorsale non si è preservata. Si vedono le striature laterali e si intravede la protuberanza della piega dorsale. Tale superficie è costituita da sedimento piuttosto grossolano, biogenico, i clasti di dimensioni maggiori sembrano foraminiferi. A causa della granulometria del riempimento tale esemplare non risulta ben conservato (Fig. 25A-D).

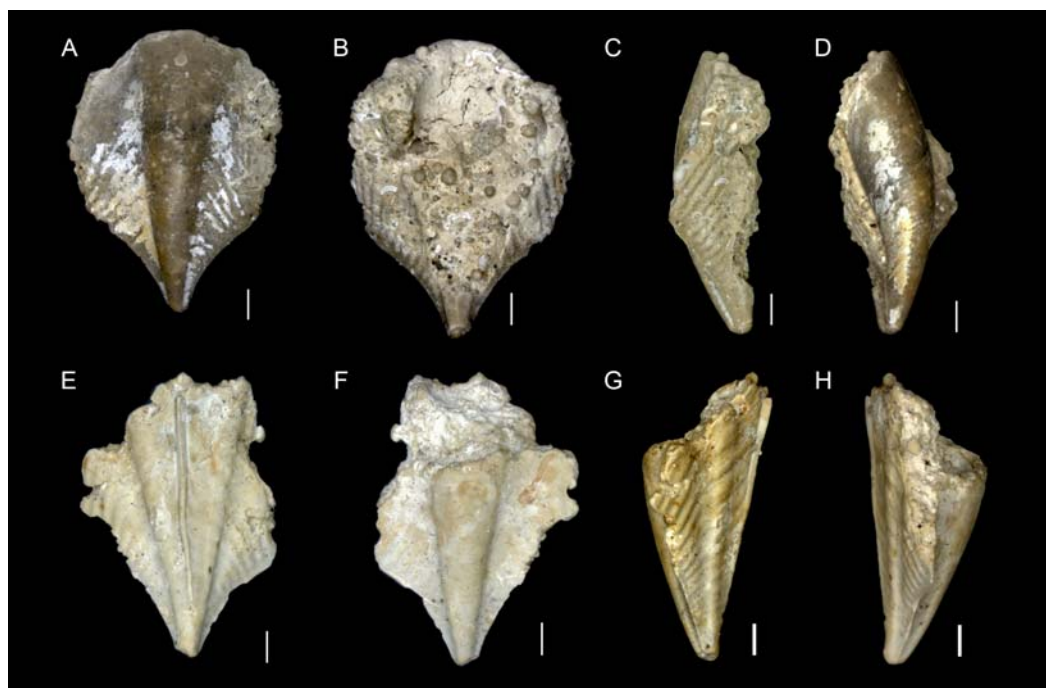


Fig. 25. Modelli interni di *C. cuspidata*, la barretta equivale ad 1 mm.

J73-17_2

L'esemplare J73-17_2 è meglio conservato rispetto al precedente. Il riempimento ha una granulometria molto più fine che permette una riproduzione migliore dei dettagli della piastra dorsale e ventrale. La parte dorsale è caratterizzata da una piega centrale molto evidente, sono inoltre ben visibili anche le pieghe laterali. L'esemplare mostra delle macchie biancastre e altre rossicce, le prime sono dovute a precipitazione carbonato di calcio, le seconde alla probabile precipitazione di ossidi ferrosi le seconde. La piastra ventrale è incompleta mentre l'apertura non è preservata (Fig. 25E-H).

Clio pyramidata

J73-17_1

L'esemplare è costituito esclusivamente dal modello interno incompleto a cui si associa un concrezionamento dello stessa litologia (micrite). La parte superiore della piastra dorsale è conservata, così come la piega ventrale. Il lato ventrale è anch'esso riprodotto, le spine laterali sono accennate. Il modello interno è abbastanza omogeneo e di colore marrone chiaro. Il frammento associato al modello interno è concavo dal lato ventrale dello pteropode, mentre sul lato dorsale dello pteropode è convesso con una superficie irregolare caratterizzata dalla presenza di tubicini calcarei bianchi (Fig. 27Q-T).

J73-17_2

La conchiglia è totalmente bianca opaca, di aspetto porcellanaceo. La conchiglia nel complesso è quasi integra, a parte la mancanza di un frammento sul lato sinistro della teleoconca e l'assenza della protoconca. Sono ben visibili le strie di accrescimento sia sul lato ventrale che su quello dorsale. All'interno della conchiglia è presente un'incrostazione di micrite, che testimonia l'inizio di una diagenesi precoce (Fig. 26E-H).

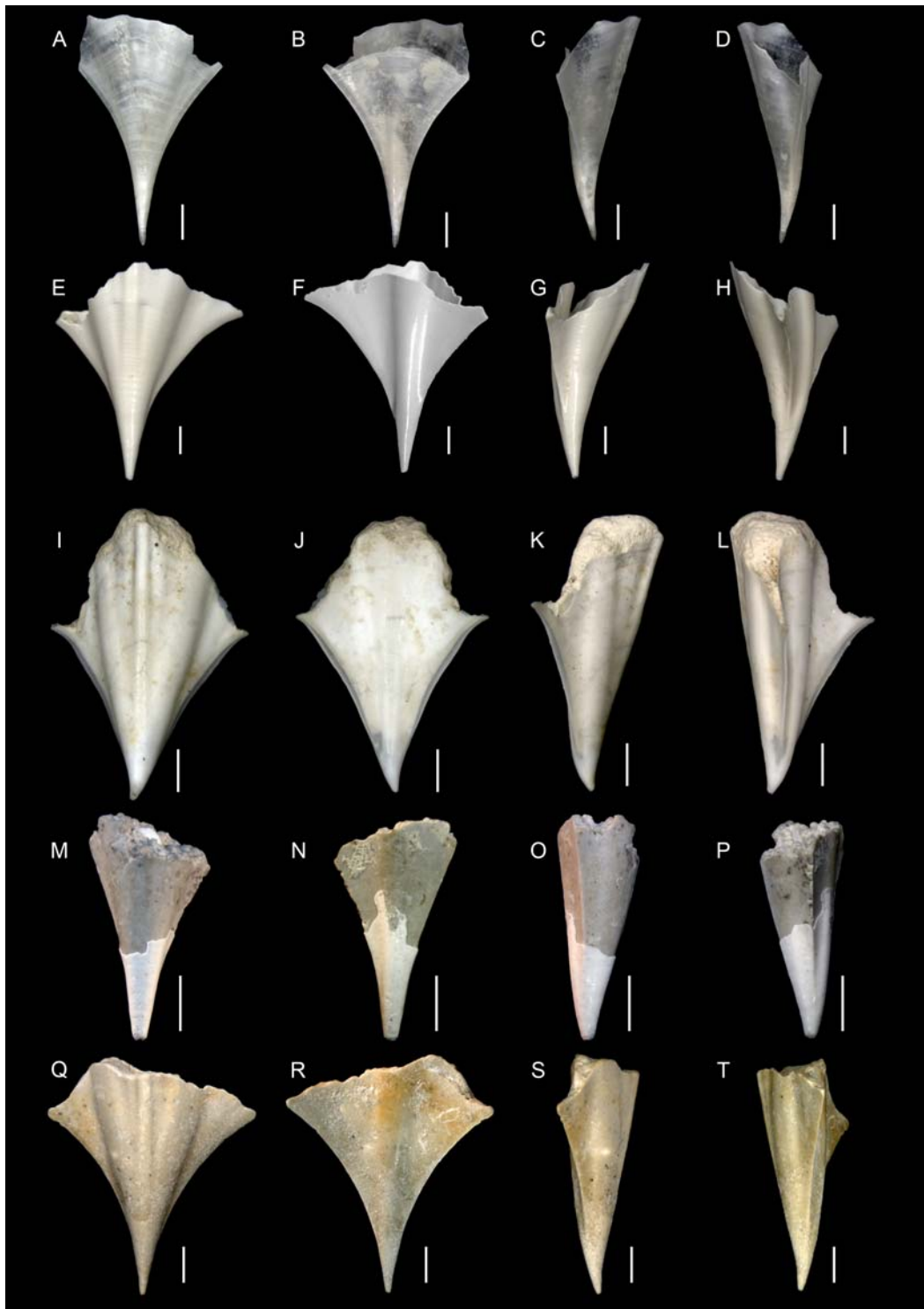


Fig. 26. “Serie diagenetica” di *C. pyramidata*. È da notare come ci sia una continua progressione nella preservazione del guscio da ben conservato e ialino a modello interno. La barretta equivale ad 1 mm.

J73-17_2 bis

La conchiglia è di colore bianco opaco, di aspetto porcellanaceo. Il suo aspetto è simile all'esemplare J73-17_2, ma si distingue per una maggiore alterazione del guscio, che si nota dalla maggiore opacità della superficie, la conchiglia è inoltre più eterogenea per la presenza di sporadici puntini sulla superficie, potrebbe trattarsi di minuscoli fori, oppure di minerali di Fe e Mn depositati sulla superficie. Le strie di accrescimento sono meno evidenti e sulla superficie sono presenti delle sottili graffiature ben visibili. L'esemplare è privo della protoconca. Anche in questo caso, delle incrostazioni micritiche sulla superficie interna testimoniano l'inizio di una diagenesi precoce (Fig. 28C-D).

J73-17_3

L'esemplare è costituito unicamente dalla conchiglia originaria dello pteropode. Il guscio è di colore bianco ed è lievemente puntinato su tutta la superficie. Sui lati dorsale e ventrale è caratterizzato dalla presenza di aloni di colore arancione e di piccole incrostazioni rossicce più o meno sporgenti. Questo esemplare conserva quasi interamente il guscio, la parte superiore della piastra ventrale è fratturata ai lati, ma conserva la piega centrale, che sporge sopra la piastra dorsale, in modo da preservare parzialmente la forma originale dell'apertura. Le spine laterali si conservano in parte, mentre la spina caudale è priva della protoconca (Fig. 27A-D).

J73-17_4

L'esemplare mostra un modello interno con un residuo di conchiglia che ricopre circa la metà della superficie, in particolare la conchiglia embrionale e una parte della teleoconca sul lato dorsale. Il residuo del guscio originale è di colore bianco opaco.

Il modello interno è totalmente consolidato ed è di colore grigio. Il modello interno non riproduce fedelmente la conchiglia di *C. pyramidata*, poiché mancano totalmente le spine laterali e la parte apicale (Fig. 26M-P).

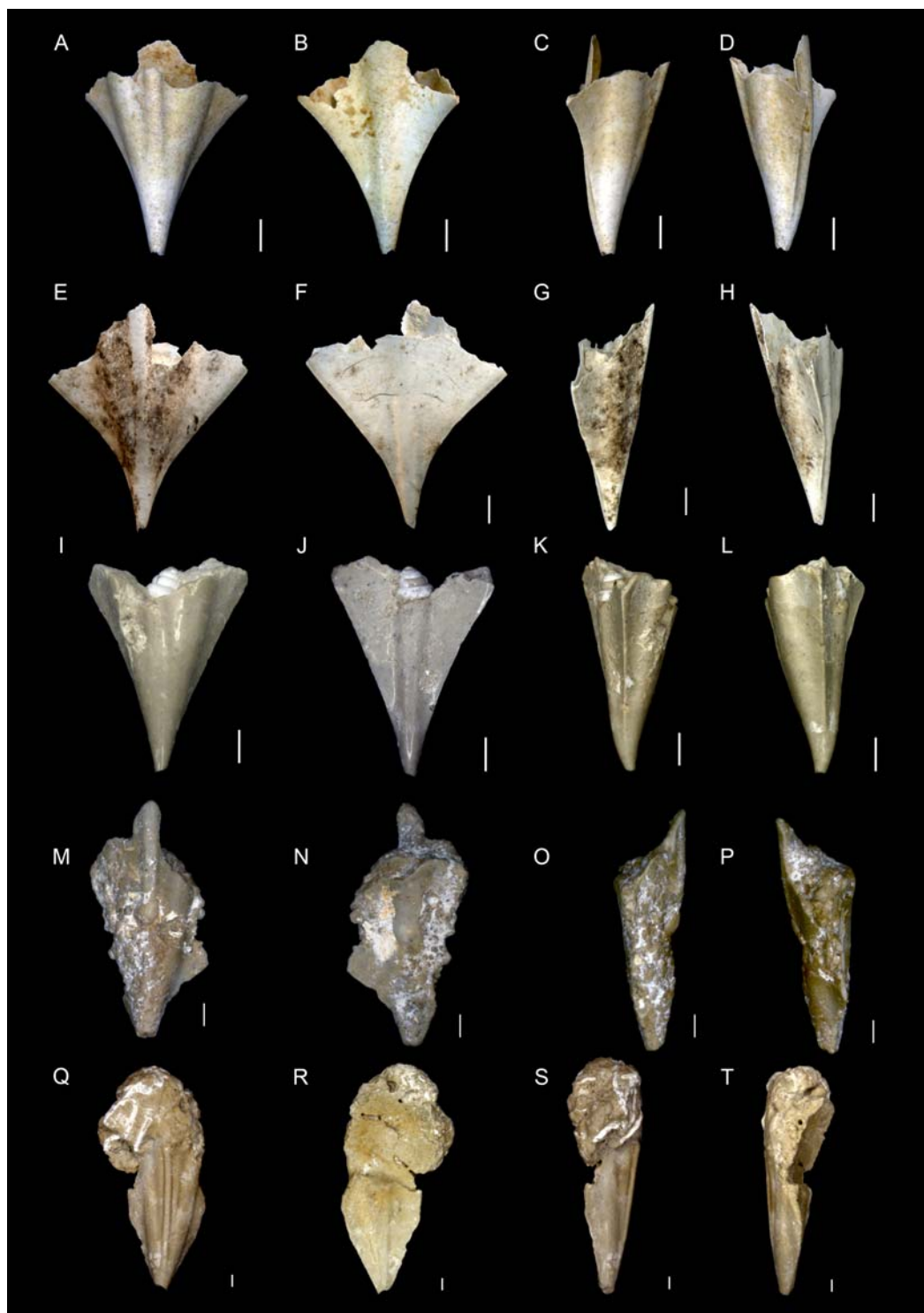


Fig. 27. “Serie diagenetica” di *C. pyramidata*. È da notare come ci sia una continua progressione nella preservazione del guscio da porcellanaceo a modello interno fortemente alterato (M-T). La barretta equivale ad 1 mm.

J73-17_5

L'esemplare è costituito da un modello interno di colore grigio e ben conservato. Le superfici sono compatte e omogenee. La parte della spina caudale mostra la leggera curvatura da cui, nella conchiglia originale, parte la protoconca, che anche in questo caso non viene riprodotta. Le spine laterali sono ben pronunciate, sono ben visibili le pieghe dorsali ventrali. La particolarità di questo esemplare è dovuta alla presenza di un'altra specie di pteropode incastonato nel modello interno a livello dell'apertura. Si tratta di una *Limacina retroversa*, che si preserva con conchiglia esterna originale e modello interno. La conchiglia ricopre quasi totalmente la superficie dell'esemplare, ma in alcuni punti lascia intravedere il modello interno sottostante, costituito anch'esso da materiale fine e di colore grigio, probabilmente argilla (Fig. 27I-L).

J73-17_6

L'esemplare è rappresentato esclusivamente dal modello interno, il sedimento di cui è costituito è di colore giallastro tendente all'arancione sulla piastra dorsale in corrispondenza della piega dorsale; sono presenti numerose incrostazioni bianche su entrambe le superfici e sporadiche patinature scure (Fig. 26Q-T).

J73-17_6 bis

L'esemplare è costituito esclusivamente dal modello interno ed è molto simile all'esemplare J73-17_6. Analogamente all'esemplare precedente sono presenti sfumature di colore arancione e piccole macchie scure, questa volta più numerose. Le incrostazioni biancastre in questo caso sono più evidenti e formano dei raggruppamenti di dimensioni maggiori, come ad esempio le due aree bianche presenti sul lato dorsale. L'aspetto del modello interno è meno liscio rispetto a quello dell'esemplare precedente, sono presenti infatti dei piccoli solchi, in corrispondenza dei quali si deposita il materiale biancastro, che molto probabilmente costituisce una riprecipitazione del carbonato di calcio.

J73-17_7

L'esemplare è costituito esclusivamente dal modello interno, è molto alterato tanto che risulta difficile attribuire la specie. Sulla superficie sono presenti patine bianche di carbonato di calcio. Il modello interno è meglio conservato sul lato

destro, mentre sul lato sinistro ha un aspetto molto più alterato ed è caratterizzato dalla presenza di sferule. Probabilmente questo aspetto è dovuto al fatto che la conchiglia originale si è parzialmente disciolta prima della litificazione del riempimento interno. Si riconosce chiaramente la piega dorsale, mentre quella ventrale, sul lato opposto, è solo accennata (Fig. 27M-P).

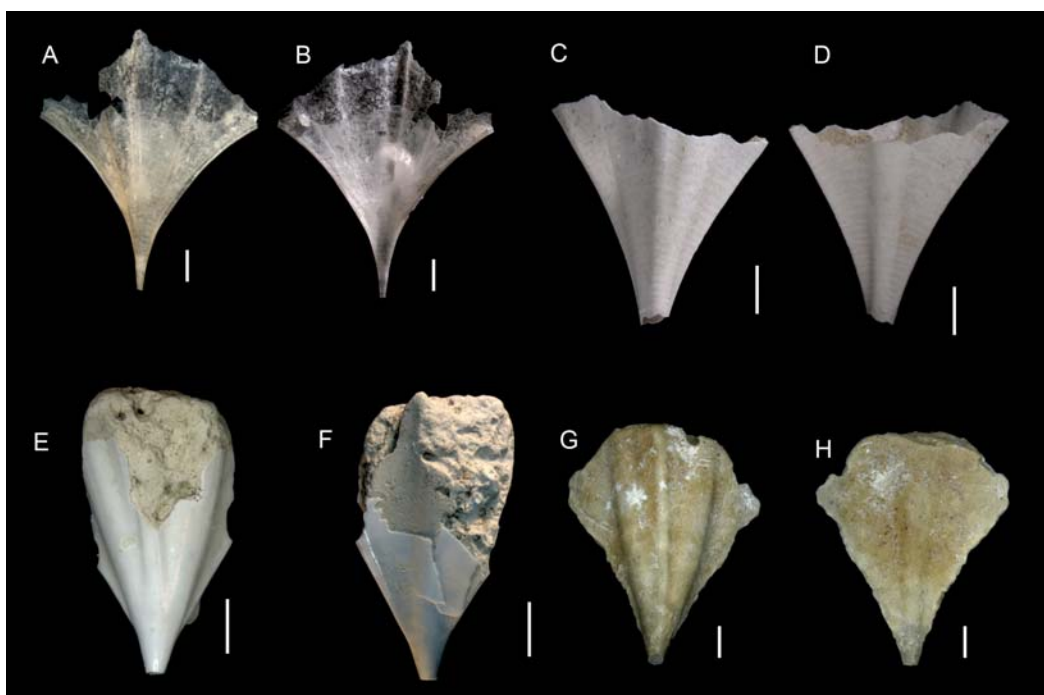


Fig. 28. “Serie diagenetica” di *C. pyramidata*. La preservazione del guscio va da ialina (A, B) a porcellanaceo (C, D) a modello interno con residui di guscio (E, F) a modello interno (G, H). La barretta equivale ad 1 mm.

T 74-65_1

La conchiglia ialina è estremamente fragile, ma molto ben conservata. È l’unico esemplare con la protoconca è integra. Sulle piastre dorsale e ventrale sono ben visibili le strie di accrescimento (Fig. 26A-D).

T74-65_1bis

L’esemplare è quasi integro, conserva la parte superiore della parte dorsale, che si allunga sopra la piastra dorsale. La superficie del lato dorsale è quasi intatta, se non fosse per un piccolo tassello mancante sul lato sinistro; la piega dorsale è ben visibile. La protoconca è assente, la frattura potrebbe essere recente. La conchiglia è quasi completamente trasparente e fragile (Fig.28A-B).

T74-65_2

L'esemplare è costituito dal modello interno e dalla conchiglia esterna, in buono stato di conservazione. Il campione mostra una conchiglia tendenzialmente opaca e porcellanacea con un aspetto più trasparente verso le spine laterali. La conchiglia è integra, ad eccezione della protoconca e all'estremità inferiore si osserva un piccolo foro. La conchiglia è completamente riempita, fino al bordo dell'apertura, il sedimento è semilitificato, i granuli di dimensioni superiori all'argilla (silt), sembrano di natura carbonatica. Questo esemplare potrebbe rappresentare uno stadio iniziale di cementazione carbonatica (micrite) (Fig. 26I-L).

T74-65_2bis

L'esemplare in questione è molto simile al T74-65_2. La conchiglia bianca e opaca ha le stesse caratteristiche di quella dell'esemplare precedente, ma in questo caso si presenta più fratturata e lascia scoperto gran parte del riempimento sottostante. Il sedimento che costituisce il modello interno è molto 'friabile' e non del tutto consolidato. In questo caso la protoconca si è distaccata del tutto, il foro è di dimensioni maggiori rispetto all'esemplare precedente (Fig. 28E-F).

T74-65_3

L'esemplare presenta una conchiglia bianca opaca, senza il modello interno. La parte dorsale è quasi completamente ricoperta da una patina marrone scura, la parte ventrale presenta delle piccole zone di colore scuro e qualche sporadica macchia marrone chiaro. L'esemplare conserva la parte superiore del lato dorsale, anche se è in parte frammentata. La protoconca è assente. Le incrostazioni all'interno indicano un inizio di riempimento sedimentario (Fig. 27E-H).

T74-65_4

L'esemplare mostra un modello interno con abbondante residuo del guscio originario. È molto simile agli esemplari T-74-65_2 e T74-65_2 bis. Il modello interno sembra però più consolidato e ha delle macchie scure sul lato ventrale lasciato scoperto dalla conchiglia. La parte ventrale lascia scoperta una porzione maggiore del modello interno, il guscio ricopre solo la porzione terminale della

spina caudale. Il modello interno da questa parte è abbastanza omogeneo e non presenta patine scure. La spina laterale destra non è conservata, mentre resta un accenno della spina laterale sinistra (Fig. 29E-H).

T74-65_5

L'esemplare è rappresentato unicamente dal modello interno, costituito da materiale fine e omogeneo, di colore chiaro. Sul lato dorsale è presente un'evidente striatura obliqua di colore marrone-rossiccio, qualche macchia sparsa di colore scuro e qualche foro. La spina laterale sinistra non è stata riprodotta, mentre quella destra è accennata. La spina caudale è anch'essa troncata. Il lato ventrale mostra un'alone marroncino al centro e alcune linee nere che corrono trasversalmente alla superficie (Fig. 29A-D).



Fig. 29. Modelli interni di *C. pyramidata*. Si può notare il differente stato di conservazione tra l'esemplare in alto (A-D) che presenta anche residui del guscio

porcellanaceo e l'esemplare E-H che mostra un modello interno fortemente alterato. La barretta equivale ad 1 mm.

Cavolinia gibbosa

J73-17_1

L'esemplare è rappresentato esclusivamente dal modello interno, che appare ben conservato. Sono ben visibili le tre pieghe dorsali, mentre la spina caudale è troncata. Sui lati dorsale e ventrale sono presenti numerose concrezioni calcaree (Fig. 30).

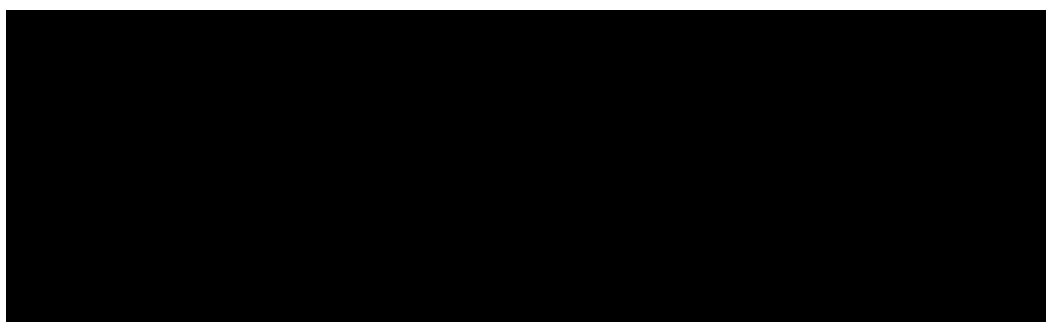


Fig. 30. Modello interno di *C. gibbosa*, la grana fine del modello interno permette di riconoscere diversi particolari del guscio. La barretta equivale a 1 mm.

Cavolinia inflexa

J73-17_1

L'esemplare J73-17_1 di *Cavolinia inflexa* mostra la parte dorsale di colore chiaro, completamente ornata da un alone giallo ocre su tutta la superficie. La piastra ventrale è bianca giallastra ed è caratterizzata dalla presenza di un foro sulla curvatura ventrale (scavatura sulla piastra ventrale), che lascia scoperta la parte grigia sottostante, cioè il modello interno. Tale conformazione può essere interpretata come modello interno con guscio quasi completo (Fig. 31).



Fig. 31. Modello interno di *C. inflexa*. La barretta equivale a 1 mm.

Cavolinia tridentata

J73-17_1

L'esemplare J73-17_5 è quello meglio preservato. Il riempimento riproduce completamente la forma della *C. tridentata*. La parte terminale della piastra dorsale è integra. La piastra dorsale e quella ventrale sono ricoperte da patine di colore bianco per gran parte della superficie. La piastra ventrale conserva parzialmente il guscio anche se alterato, mentre l'apertura mostra un riempimento differente rispetto al modello interno (Fig. 32A-B).

J73-17_2

L'esemplare è di dimensioni inferiori rispetto agli altri, è abbastanza conservato e presenta la porzione terminale della piastra dorsale. Il corpo principale della *Cavolinia* è di dimensioni inferiori rispetto agli altri, ma è molto più levigato, tanto da non permettere il riconoscimento delle spine laterali, mentre la spina caudale si presenta come un leggero rigonfiamento (Fig. 32 C-D).

J73-17_3

L'esemplare è piuttosto alterato e si presenta come modello interno. È riconoscibile come appartenente a *C. tridentata*. La piastra ventrale è ricoperta per buona parte da macchie. La piastra dorsale al contrario risulta quasi solamente come modello interno, senza patinature.. Le spine laterali non sono visibili, anche se delle protuberanze laterali ne ricordano l'esistenza, e neanche la parte terminale della piastra dorsale (apertura). La spina caudale è ben visibile, pur mancando la proto conca; questi elementi comunque non inficiano

l'identificazione della specie, anche se l'esemplare non è perfettamente riprodotto (Fig. 32E-F).

J73-17_4

L'esemplare è di colore grigiastro con lievi patinature bianche di precipitati carbonatici. Il modello interno è costituito da sedimenti silicoclastici (argilla). Sono ben riconoscibili la forma globosa della specie e buona parte della spina caudale, ma non sono presenti elementi che ricordano le spine laterali. Le superfici sono molto levigate, soprattutto la piastra ventrale, dove sono presenti delle sottili crepe più chiare, probabilmente dovute alla fuoriuscita dell'acqua interstiziale durante la litificazione del riempimento. Sono visibili sporadiche macchie scure sulla superficie dovute alla precipitazione di minerali di ferro e manganese (Fig. 32G-H).

J73-17_5

L'esemplare è il più alterato tra quelli analizzati. La morfologia originale è difficilmente individuabile, a causa dello stato di preservazione fortemente alterato. Sono presenti delle evidenti concrezioni di colore bianco-giallastro, simili a piastre, che ricoprono la superficie del modello interno. Questi concrezionamenti sono piuttosto uniformi e possono essere considerati residui molto alterati della conchiglia originaria, oppure potrebbero essere dovuti alla ricrescita secondaria di aragonite (pseudoguscio). Questi residui carbonatici ricoprono una percentuale abbastanza elevata della superficie del campione, principalmente nella piastra dorsale e in misura minore nella piastra ventrale (Fig. 32I-J).

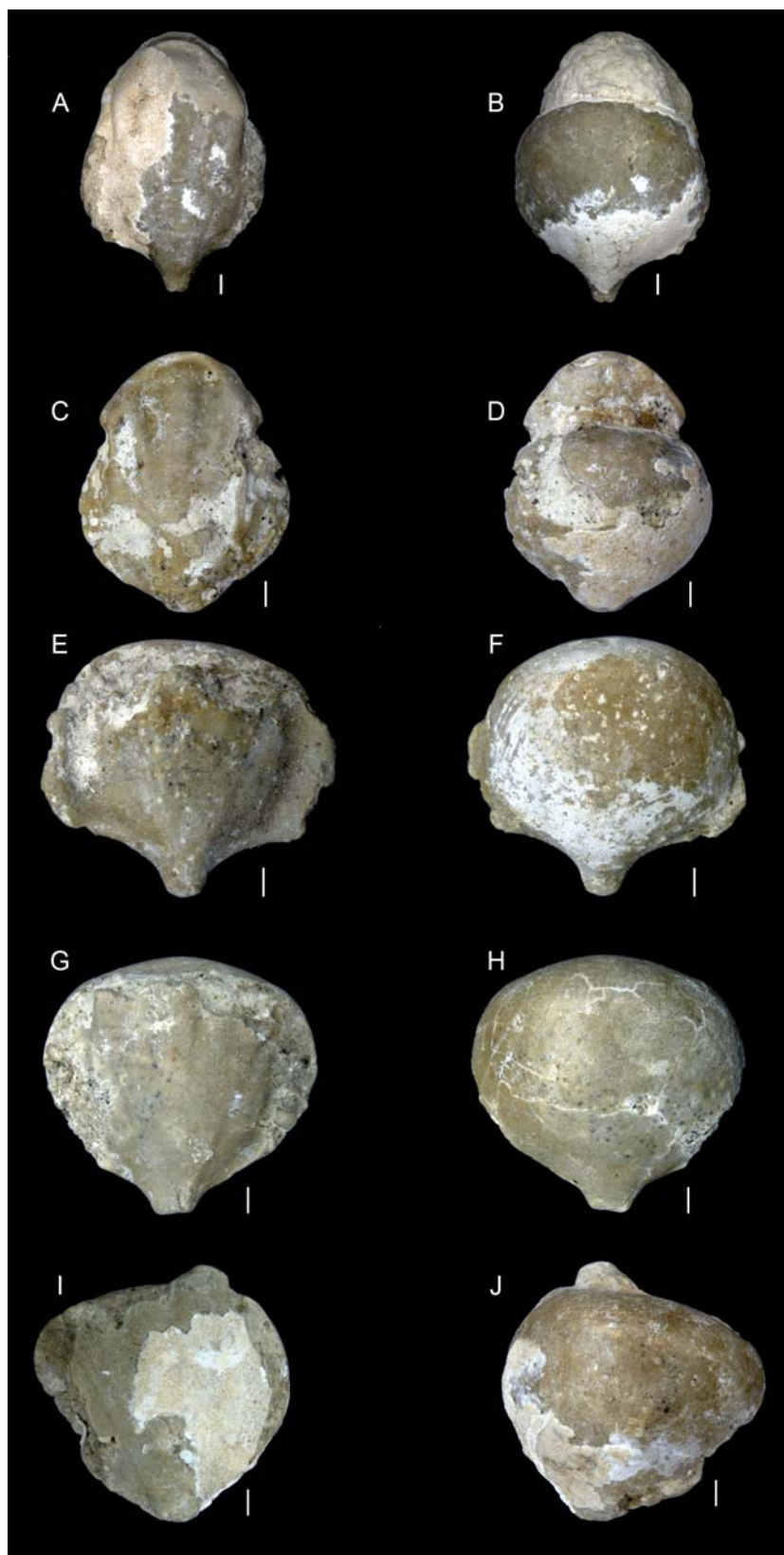


Fig. 32. “Serie diagenetica” di preservazione dei modelli interni di *C. tridentata*.
La barretta equivale a 1 mm.

4.1.2 Classificazione degli esemplari

Le classi utilizzate rappresentano le modalità di preservazione individuate sulla base delle indicazioni fornite da Almogi-Labin et al. (1986) e sono rappresentate in Tab. 3.

- **CLASSE A. CONCHIGLIE TRASPARENTI:** questa modalità indica un'eccellente stato di preservazione. La classe comprende sia conchiglie di pteropodi attuali, che gusci di pteropodi perfettamente preservati all'interno dei sedimenti.
- **CLASSE B. CONCHIGLIE BIANCHE-OPACHE:** gli esemplari appartenenti a questa classe sono ben conservati, ma la trasparenza si è persa, probabilmente a causa di una lieve corrosione della conchiglia. Le conchiglie hanno un aspetto 'porcellanaceo'.
- **CLASSE C. MODELLI INTERNI CON RESIDUI DELLA CONCHIGLIA ORIGINARIA.** L'intensa dissoluzione dell'aragonite che ha come risultato la distruzione e la frammentazione della conchiglia e alcuni residui della conchiglia sono l'unica traccia della struttura originaria, che è preservata come una copertura esterna del modello interno. Le parti del guscio che si conservano più probabilmente sono quelle più spesse. In certi casi si conserva gran parte della conchiglia originale esterna, ma il sedimento interno è molto indurito. In certe conchiglie si forma una zona ispessita e orlata al posto della conchiglia originale.
- **CLASSE D. MODELLO INTERNO.** In questo caso manca completamente la conchiglia originaria, a causa della dissoluzione dell'aragonite. Gran parte dei modelli interni è formata da sedimento molto fine e la loro forma è molto simile alla conchiglia originaria. I modelli interni sono costituiti per più del 90% da calcite altomagnesiaca (HMC), circa due volte il contenuto medio presente nella circostante frazione sedimentaria.
- **CLASSE E. RICRESCITA SECONDARIA DI ARAGONITE:** In questo caso il guscio originale non è preservato, ma si conserva il modello interno, con uno pseudoguscio esterno, dovuto alla dissoluzione e riprecipitazione dell'aragonite.

Per quanto riguarda la classe C, precedentemente descritta, sono state introdotte due sottoclassi, C1 e C2. La sottoclasse C1 comprende gli esemplari con

conchiglia quasi integra e modello interno consolidato non completamente litificato, mentre la sottoclasse C2 comprende esemplari con modello interno molto ben consolidato e residui parziali di guscio. La sottoclasse C1 comprende esemplari con guscio ricoprente più della metà della superficie, mentre per la sottoclasse C2 si è stabilito che i modelli interni debbano avere un residuo parziale inferiore alla metà della superficie.

Specie	Classe A	Classe B	Classe C		Classe D	Classe E
			C1	C2		
<i>C.lamarkii</i>					J73-17_1	
<i>L.retroversa</i>			<i>C. pyramidata</i> J73-17_5	<i>C. pyramidata</i> J73-17_6		
<i>C.atlantica</i>				J73-17_3	J73-17_1 J73-17_2	
<i>C. cuspidata</i>					J73-17_1 J73-17_2	
<i>C.pyramidata</i>	T74-65_1 T74-65_1bis	J73-17_2 J73-17_2bis J73-17_3 T74-65_3	J73-17_4 T74-65_2 T74-65_2bis T74-65_4	J73-17_4	J73-17_1 J73-17_5 J73-17_6 J73-17_6bis J73-17_7 T74-65_5	
<i>C. gibbosa</i>				J73-17_1		
<i>C. inflexa</i>			J73-17_1			
<i>C. tridentata</i>				J73-17_1 J73-17_2 J73-17_3 J73-17_5	J73-17_4	
<i>D. trispinosa</i>			J73-17_1			

Tab. 3. Campioni selezionati e relativa modalità di preservazione individuata

La maggior parte degli esemplari selezionati presenta modalità di preservazione con modello interno. L'esemplare di *C. lamarkii* è l'unico ritrovato all'interno dei campioni analizzati ed è l'unico esemplare di Pterotracheoidea analizzato. La sua fragile conchiglia si conserva molto raramente all'interno del record fossile.

C. atlantica compare quasi esclusivamente come modello interno, con evidenti segni di alterazione; solo un esemplare appartenente a questa specie mostra la presenza di un esiguo residuo di guscio molto alterato. Questa caratteristica ha permesso di classificare l'esemplare nella classe C2. In quest'ultimo esemplare sono da notare le fratture su tutta la superficie, che probabilmente indicano la presenza di una deformazione durante la litificazione.

Gli esemplari di *C. cuspidata* sono stati inseriti nella classe D. È da notare che in uno dei due esemplari (J73-17_1) la parte dorsale è completamente mancante, probabilmente a causa del riempimento differenziale del campione precedente alla litificazione, mentre la parte ventrale è abbastanza ben conservata e con qualche sporadico residuo carbonatico (conchiglia originaria). Il secondo campione è molto ben conservato, con modello interno micritico. *C. tridentata* nei campioni considerati (vedi Fig. 32A-B) è stata ritrovata quasi esclusivamente come modello interno in uno stato di conservazione molto deteriorato, ad eccezione di un esemplare meglio conservato (J73-17_1). I modelli interni di *C. tridentata* non riproducono fedelmente i dettagli della conchiglia interna, nella maggior parte dei casi non sono nemmeno integri, in particolare la parte dell'apertura non è mai preservata, tranne negli esemplari J73-17_1 e J73-17_2 (Fig 32A-D). In quest'ultimo esemplare si vede la caratteristica piastra dorsale che sporge sopra quella ventrale, con le sue pieghe, anche se in maniera meno marcata rispetto al precedente.

C. pyramidata è la più abbondante e presenta un'elevata variabilità nella modalità di preservazione all'interno dei campioni considerati. Pertanto per caratterizzare questa specie è stato scelto un numero elevato di esemplari.

L'esemplare J73-17_1 è caratterizzato dalla presenza di un concrezionamento associato al modello interno che è colonizzato da organismi epibionti (serpulidi). Questo particolare indica che il frammento, così come la parte dorsale sono stati esposti.

Generalmente gli esemplari provenienti dal mar Tirreno (T74-65) sono più conservativi e presentano la conchiglia originaria da ialina a porcellanacea senza riempimento secondario.

C. inflexa è stato inserito nella classe C perché presenta il modello interno con la conchiglia quasi intatta, anche se il suo aspetto è molto alterato. *L. retroversa* non è stata ritrovata singolarmente all'interno dei campioni analizzati, ma solamente inglobata all'interno dei modelli interni degli esemplari analizzati di *Clio pyramidata*.

Nel campione di *C. pyramidata* J73-17_5 è stata ritrovata una *Limacina retroversa* all'interno del modello interno dello pteropode. La *L. retroversa* è ben visibile ed è possibile riconoscere sia la conchiglia esterna, che ricopre gran parte

della superficie, che il modello interno di colore grigio sottostante. Pertanto lo pteropode è stato collocato nella classe C1.

Inaspettatamente, la specie *L. retroversa* è stata trovata anche all'interno di un altro esemplare, in particolare all'interno dell'esemplare J73-17_6 di *C. pyramidata*. Il ritrovamento all'interno del modello interno è stato effettuato solo dopo aver sezionato lo pteropode.

La discussione di questa particolare modalità di ritrovamento verrà fatta successivamente, all'interno del secondo paragrafo del capitolo.

4.2 Analisi al microscopio a scansione della serie diagenetica di *Clio pyramidata*

Le *Clio pyramidata* sono state selezionate come una progressione diagenetica rappresentativa delle modalità di preservazione schematizzate da Almogi-Labin *et al.*, (1986). I due estremi della serie diagenetica sono rappresentati da una parte da conchiglie perfettamente conservate, trasparenti e ialine, mentre, dall'altra parte, sono rappresentate dai soli modelli interni.

Il primo set di *C. pyramidata* (5 esemplari) è stato selezionato per le analisi al microscopio sulle sezioni lucide. Le sezioni sono state fatte perpendicolarmente alle piastre dorsali e ventrali, lungo l'asse maggiore della conchiglia. In questo modo si rende visibile l'interno della conchiglia e si espone la sezione della conchiglia che mostra l'accrescimento dell'organismo.

Il secondo set di *C. pyramidata* (4 esemplari) è stato selezionato per le analisi morfologiche al microscopio a scansione.

La Tab. 4 elenca le due serie analizzate di *C. pyramidata*, scelte rispettivamente per le analisi su sezione lucida e per le analisi morfologiche.

	Classe A	Classe B	Classe C		Classe D
			C1	C2	
1° set di campioni	T 74-65_1	J 73-17_2	T 74-65_2	J 73-17_4	J 73-17_6
2° set di campioni	T 74-65_1bis	J 73-17_2bis	T 74-65_2bis	—	J 73-17_6

Tab. 4: Si riportano le classi di preservazione delle *Clio pyramidata* e le nomenclature dei campioni utilizzati per le analisi.

La scelta non simmetrica è dovuta al fatto che, all'interno dei campioni analizzati, non è stato trovato un analogo per la classe D, con residuo parziale di guscio.

4.2.1 Analisi al microscopio a scansione su sezioni lucide

Le sezioni longitudinali del primo set di *C. pyramidata* sono state analizzate al microscopio a scansione, utilizzando il segnale di *backscattering* (Fig. 34 e 35). L'obiettivo è quello di analizzare i dettagli della microstruttura del guscio e del riempimento interno. Un ulteriore obiettivo è stato quello di valutare la composizione chimica di alcune aree opportunamente scelte all'interno dei campioni, tramite la costruzione di mappe geochemiche degli elementi presenti.

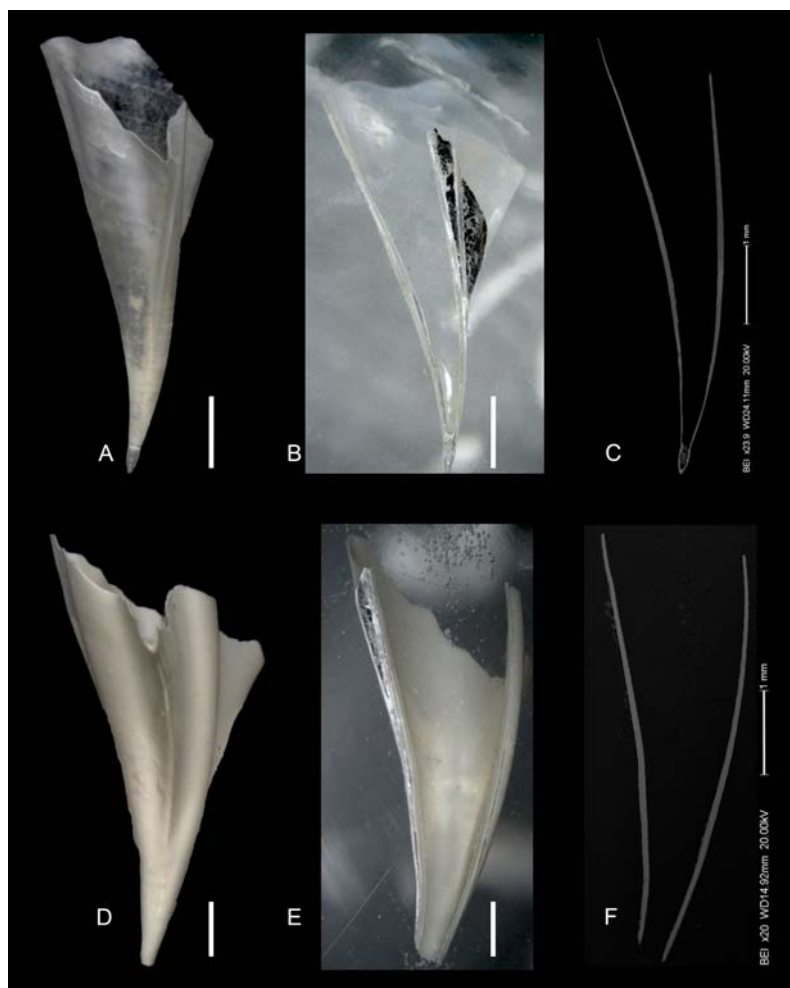


Fig. 34. Esempari utilizzati per le analisi al SEM e raggruppati secondo le classi diagenetiche descritte. A, B, C, *C. pyramidata* T74-65_1, Classe A, rappresentata rispettivamente con vista laterale sinistra, sezione sinistra (inglobata in resina) e

sezione al SEM. D, E, F, *C. pyramidata* T74-65_2, Classe B, rappresentata nel medesimo ordine.

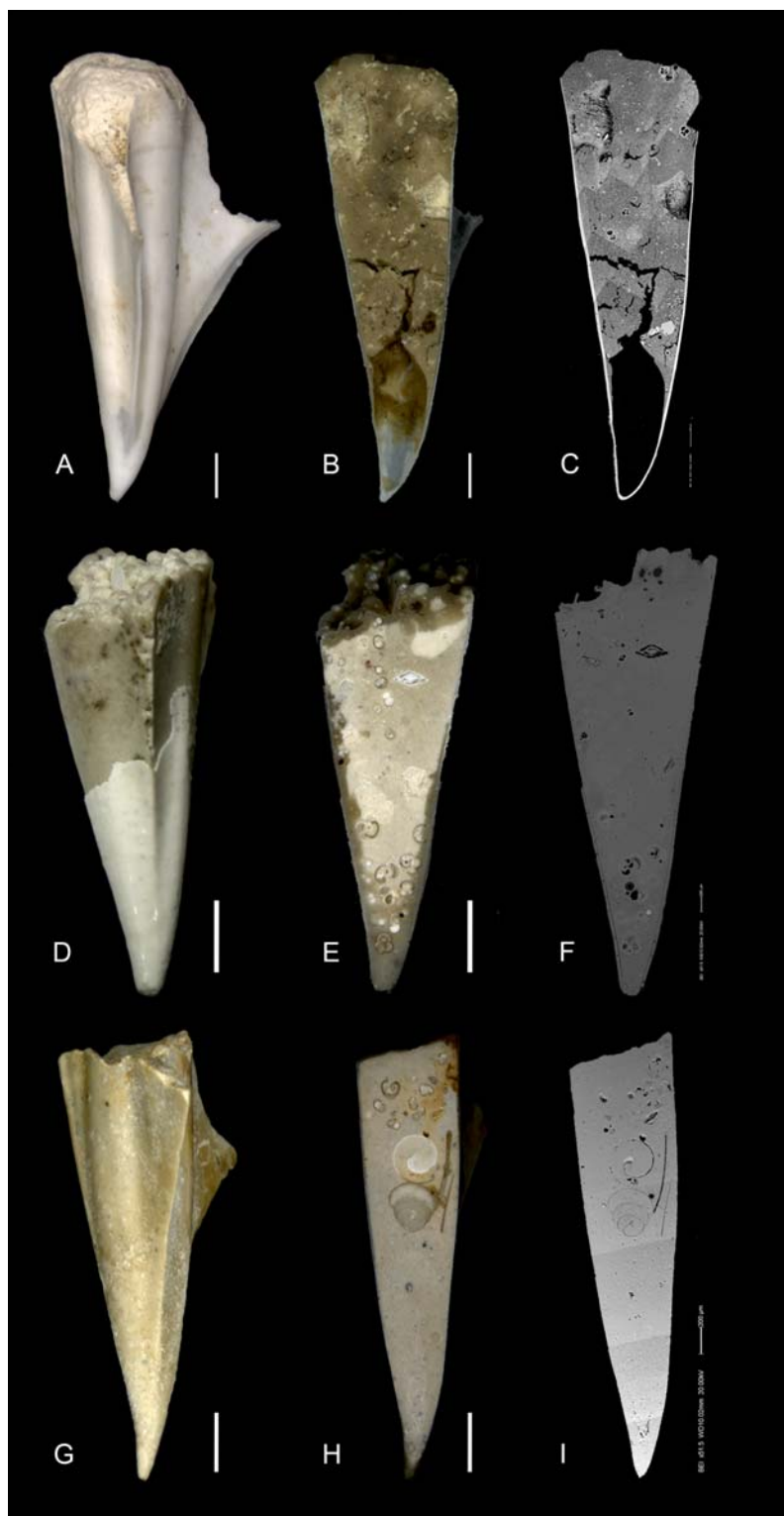


Fig. 35. Esemplici utilizzati per le analisi al SEM e raggruppati secondo le classi diagenetiche descritte. A, B, C, *C. pyramidata* T74-65_3, Classe C1, rappresentata rispettivamente con vista laterale sinistra, sezione sinistra e sezione

al SEM. D, E, F, *C. pyramidata* T74-65_4, Classe C2 e G, H, I, *C. pyramidata* T74-65_4 Classe D; rappresentate nel medesimo ordine.

4.2.1a Descrizione al microscopio ottico delle sezioni lucide

Classe A - T74-65_1

La conchiglia dell'esemplare in sezione è trasparente, priva di riempimento e si presenta piuttosto omogenea. La protoconca è leggermente scalfita alla base e mostra dei frammenti residui della metà asportata dello pteropode, queste caratteristiche sono probabilmente dovute alla preparazione del campione e alla sua fragilità (Fig. 34B).

Classe B - J73-17_2

La sezione longitudinale al microscopio ottico mostra una struttura omogenea, di aspetto porcellanaceo. Lo spessore del guscio diminuisce dalla base della conchiglia in direzione dell'apertura. L'assenza della protoconca è messa in evidenza dal foro in corrispondenza della posizione originaria della stessa. Probabilmente la base della conchiglia si è ulteriormente scheggiata durante la fase di preparazione del campione (Fig. 34E).

Classe C1 - T74-65_2

In sezione longitudinale la conchiglia mostra una conformazione tutt'altro che uniforme, con mancanza di riempimento verso la conchiglia embrionale e un progressivo riempimento verso il bordo dell'apertura. Inoltre circa a metà della conchiglia si ha una frattura all'interno del riempimento, che può essere dovuta al processo di litificazione del riempimento stesso. Il riempimento è costituito, oltre che da granuli cristallini, da frammenti di altri organismi, o da foraminiferi interi in sezione (Fig. 35B).

Classe C2 - J74-65_4

In sezione il campione mostra un riempimento eterogeneo che comprende anche dei frammenti di altri organismi, in particolare foraminiferi planctonici. È da notare la presenza di un miliolide (foraminifero bentonico) nella parte terminale e nella parte apicale di un frammento minerale di colore scuro (ferroso) (Fig. 35E).

Classe D - J73-17_6

In sezione il campione mostra un riempimento piuttosto omogeneo ed è molto interessante la presenza al suo interno di altri due pteropodi vicini tra loro e localizzati nella parte vicino all'apertura della conchiglia. I due tecosomati sono stati identificati come *Limacina retroversa*, per il loro caratteristico avvolgimento a spirale sinistrorso. È interessante notare, oltre alle grandi dimensioni delle Limacine rispetto al guscio della *Clio pyramidata*, che le due Limacine inglobate hanno un orientamento diverso tra loro. Infatti quella posta più al centro è orientata parallelamente rispetto alle piastre dorsali e ventrali dello pteropode inglobante e la sua proto concapunta verso la protoconca della *Clio* (Fig. 35H).

4.2.1b Analisi in backscattering delle sezioni lucide

Le sezioni longitudinali del primo set di *Clio pyramidata* sono state analizzate al microscopio a scansione, sfruttando principalmente il segnale degli elettroni retrodiffusi (*backscattering*). Sono state acquisite immagini dettagliate della microstruttura della conchiglia aragonitica e del riempimento della specie *Clio pyramidata*, che è caratterizzata da prismi allungati disposti in fibre ad elica racchiuse da pareti rigide che avvolgono i prismi (Fig. 40A-B).

Classe A – T74_65_1 (Fig. 36-39)

Le foto al microscopio a scansione permettono di analizzare in maniera dettagliata la microstruttura del guscio. Questo esemplare, dalle analisi al microscopio ottico, appare ben conservato senza tracce di dissoluzione del guscio; in realtà le analisi al SEM mostrano un quadro diverso con i primi segni di dissoluzione dell'aragonite.

Una scalfitura alla base della protoconca espone i prismi aragonitici di cui è costituita la conchiglia.

La protoconca presenta una frattura mediana verso il lato ventrale (Fig. 36A e 37C) e mostra i primi segni di corrosione sul lato esterno dorsale (Fig. 1 C-D) e su quello ventrale (Fig. 37C-D). Il passaggio tra la protoconca e la teleoconca è rappresentato in Fig. 37B.

Anche la parte iniziale della teleoconca è caratterizzata da corrosione superficiale dal lato esterno, come mostra la Fig. 37E. In questa zona si vede anche una

frattura mediana rettilinea, costituita dall'unione di diversi fori contigui. La medesima frattura si protrae lungo la teleoconca (Fig. 37F-G).

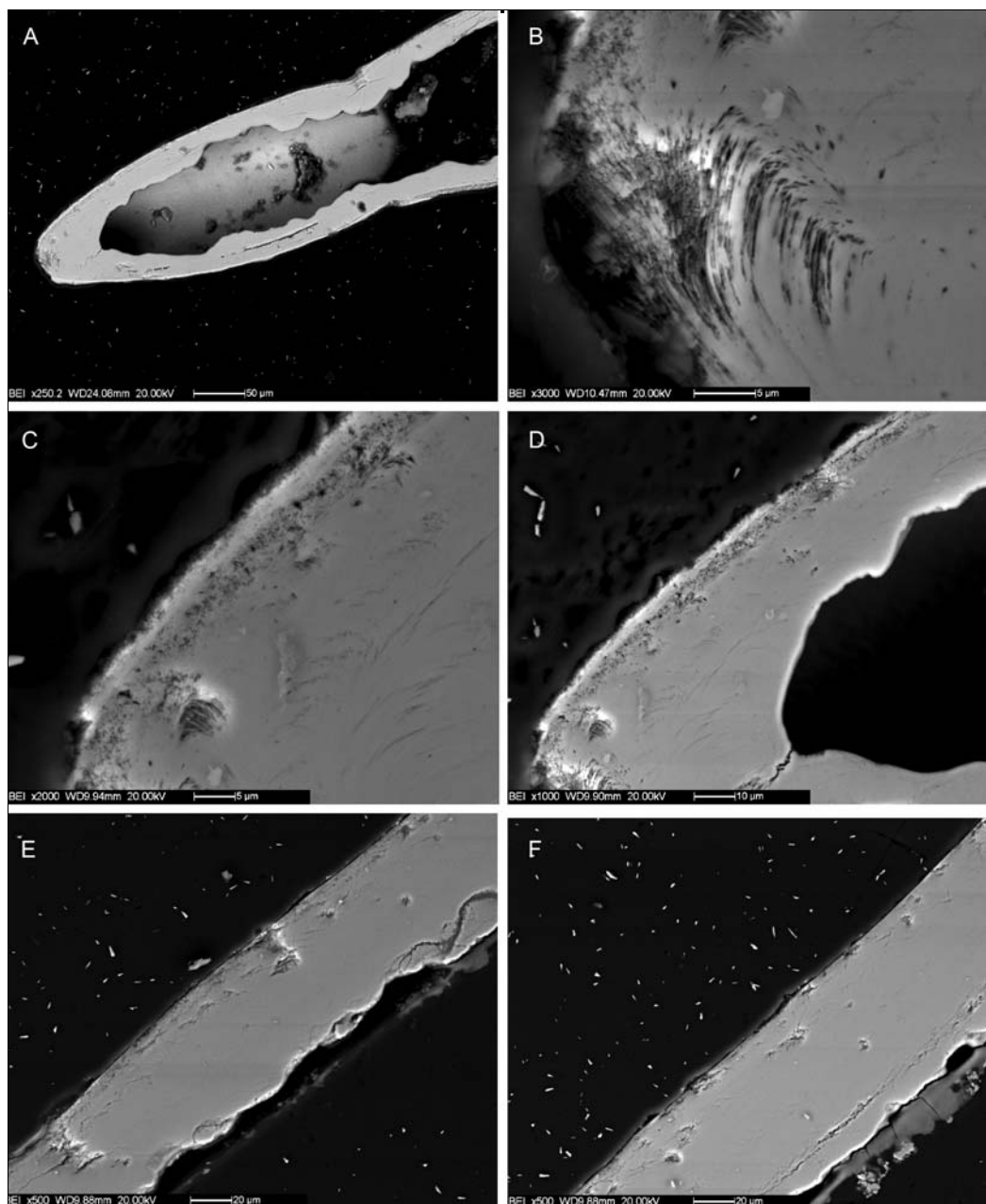


Fig. 36. Dettagli al SEM della protoconca.

In Fig. 37H, 38B-D, F e 39A-D sono visibili altri segni di alterazione del campione creatisi probabilmente durante la preparazione del campione (durante la fase di lucidatura). La parte terminale della teleoconca, rappresentata in Fig. 38G-H è molto deteriorata e presenta dei solchi profondi sulla superficie.

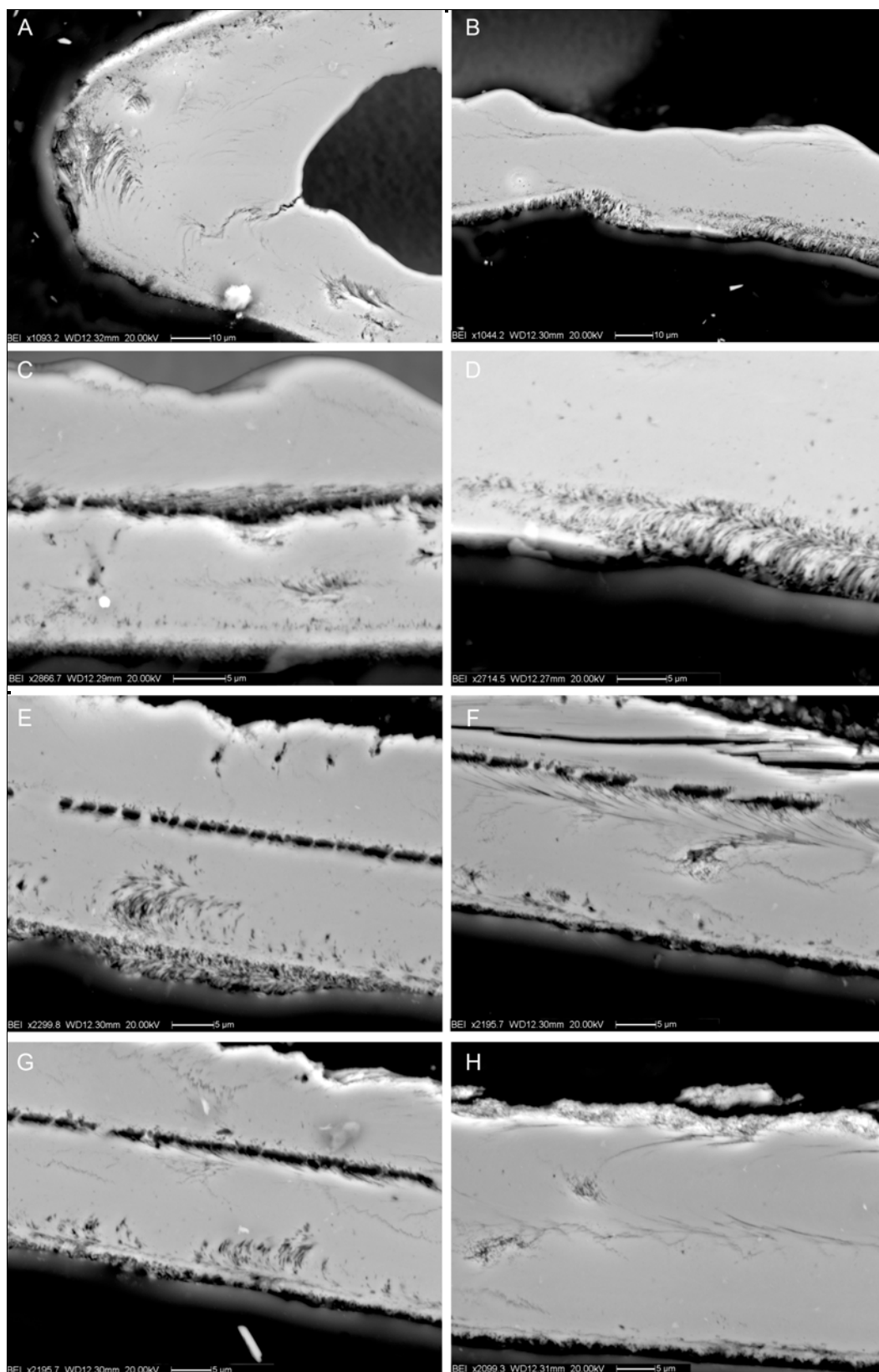


Fig. 37. Immagini SEM della teleoconca terminale.

Tutti i segnali di corrosione sono stati interpretati come effetti della dissoluzione sul guscio, tranne la scalfitura alla base della protoconca, che, considerata la

fragilità di questa parte della conchiglia, è probabilmente dovuta alla manipolazione dell'esemplare durante preparazione del campione.

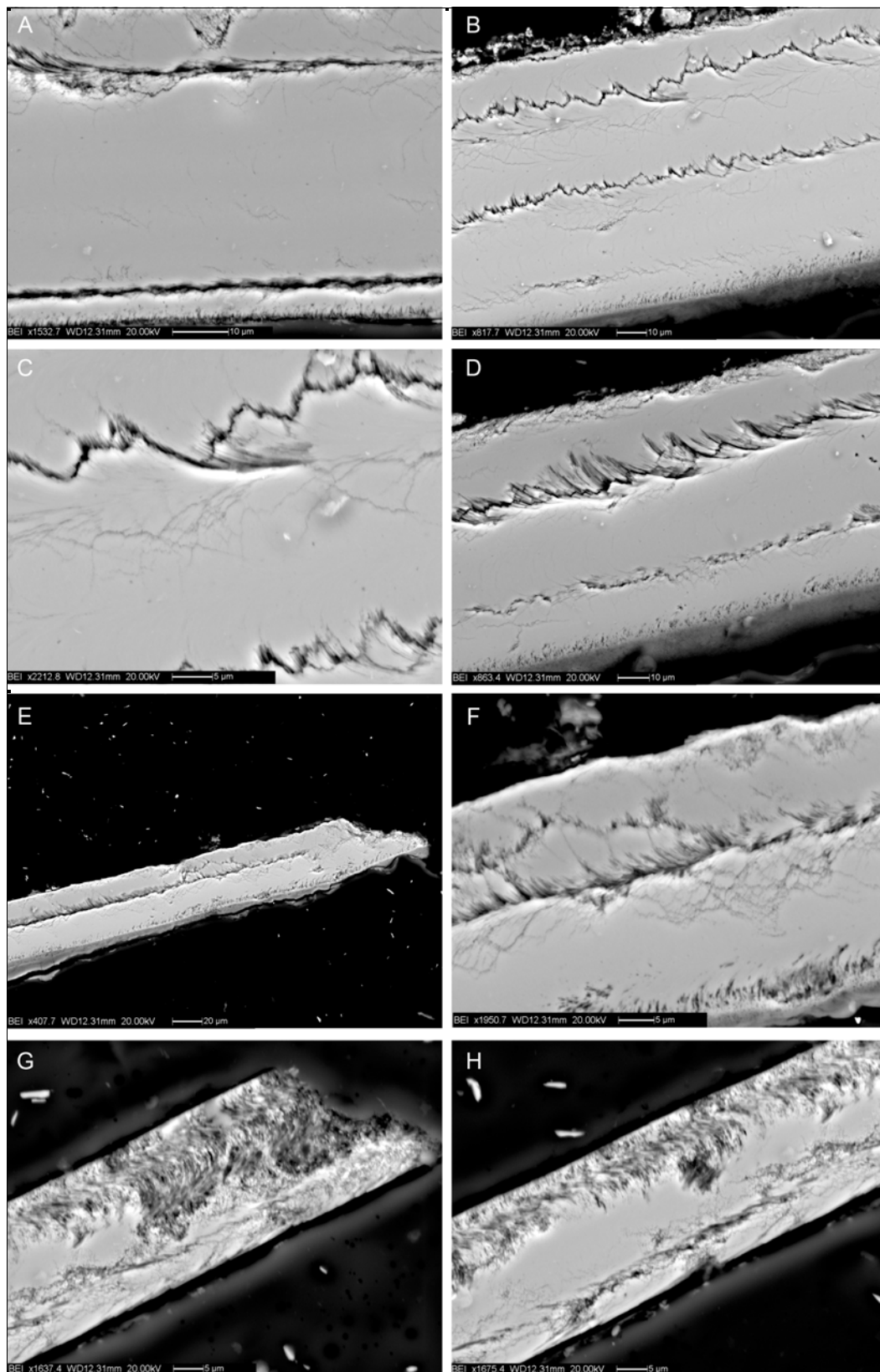


Fig. 38. Immagini SEM della teleconca apicale.

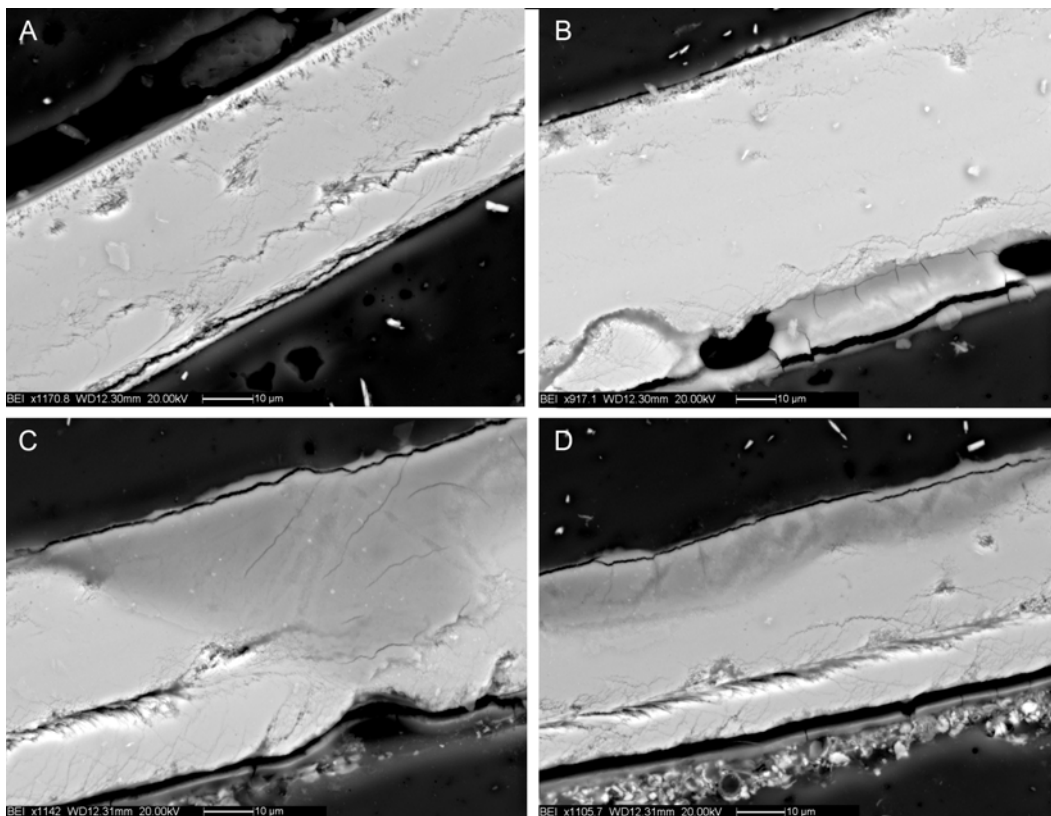


Fig. 39. Immagini SEM della teleconca apicale.

Classe B – J73-17_2 (Fig. 40-42)

L'analisi dell'esemplare al microscopio a scansione mostra chiaramente la microstruttura della conchiglia, che, dall'interno all'esterno, è costituita da 5 strati aragonitici sovrapposti: la struttura principale è costituita da due livelli di prismi aragonitici organizzati in fibre elicoidali, alternati a tre pareti rigide con organizzazione parallela dei prismi. La parete completa della conchiglia è visibile in Fig. 40B. Alcuni strati sono altri più alterati, in particolare le porzioni esterne ed interne, mentre quelle centrali sono ben conservate (Fig. 40C-F). L'intaccamento dei prismi aragonitici è all'azione progressiva della dissoluzione del guscio ad opera di processi eodiagenetici.

La dissoluzione della conchiglia può avvenire sia sulle pareti esterne che interne. La parete più esterna resiste maggiormente al processo di dissoluzione rispetto alla parete interna; quest'ultima nella maggior parte dei casi è assente mettendo in luce i prismi aragonitici dello strato elicoidale, che conferiscono così un aspetto frastagliato alla parete stessa (Fig.40D, 41C-D).

La parte terminale della teleoconca rappresenta il punto in cui è avvenuto il distacco della protoconca, ed è caratterizzata dall'assottigliamento della parete dovuto alla perdita degli strati interni ed esterni sia dal lato ventrale (Fig. 40G) che da quello dorsale (Fig. 40F).

Il fatto che la parete interna mostri dei maggiori punti di debolezza può essere dovuto alla dissoluzione preferenziale dovuta alla maggiore circolazione delle acque interstiziali all'interno degli spazi lasciati vuoti dalla degradazione della sostanza organica.

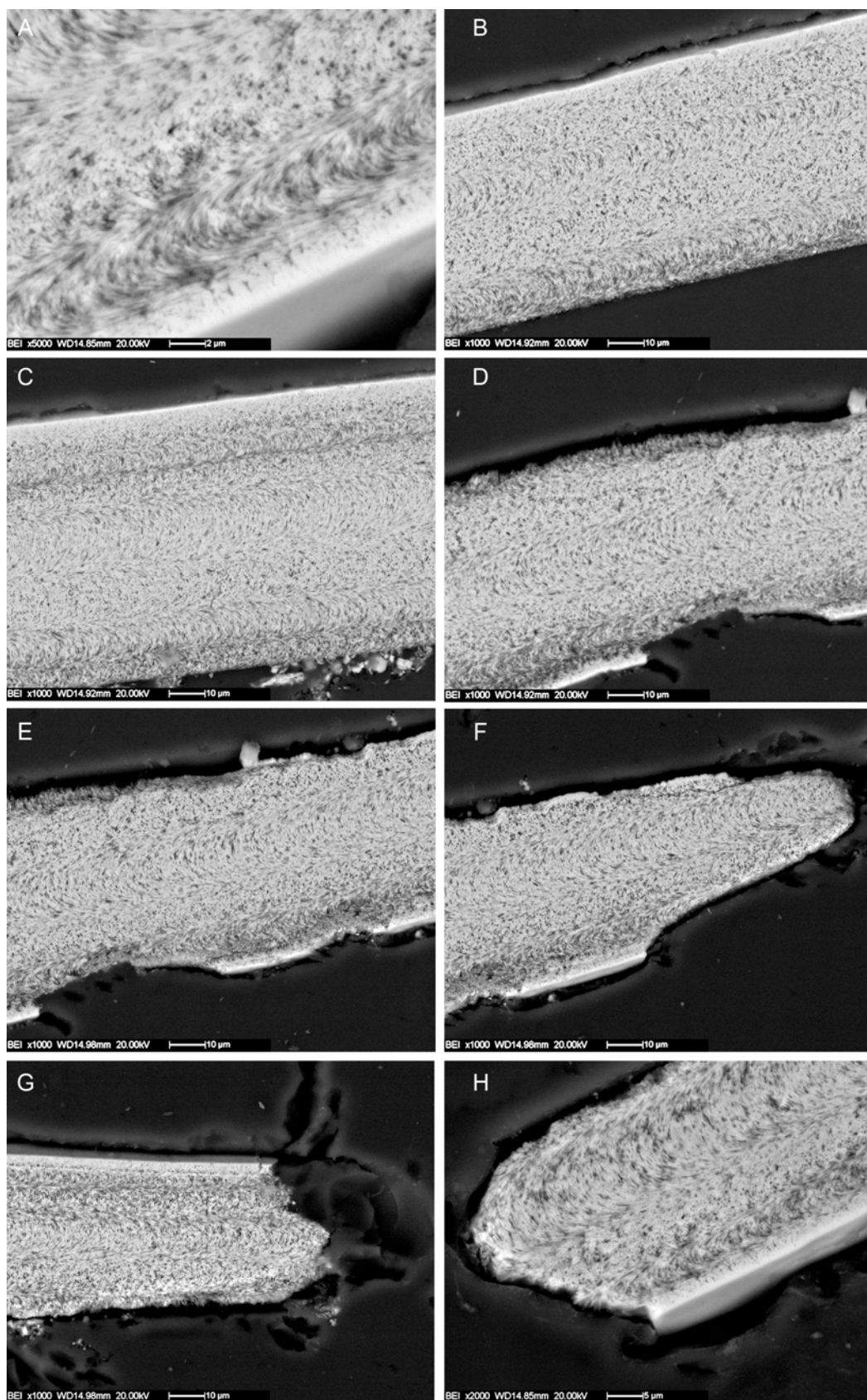


Fig. 40. Immagini SEM della teleoconca; A-E, G teleoconca ventrale; F, H teleoconca dorsale.

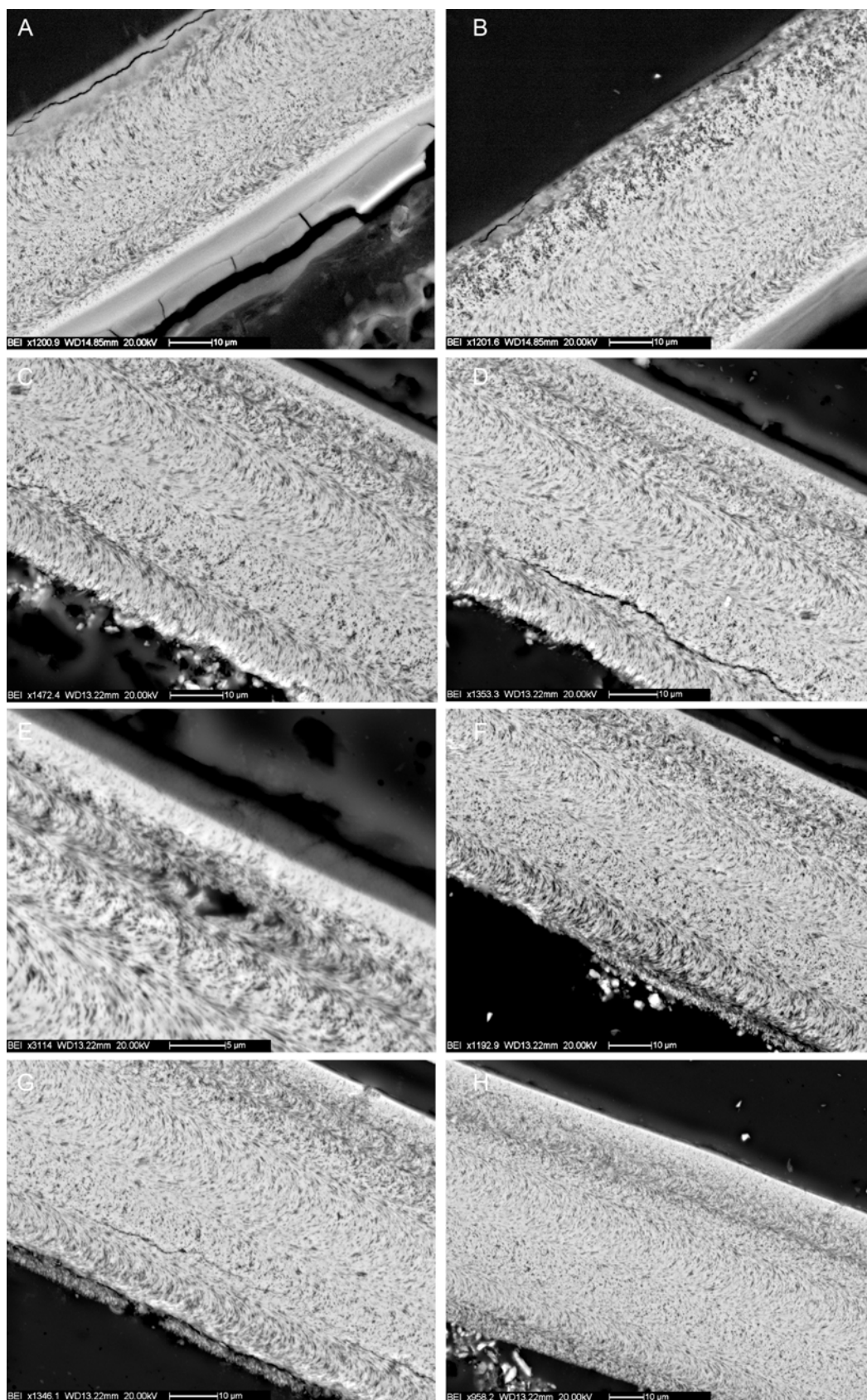


Fig. 41. Immagini SEM della teleoconca; A-B, G teleoconca dorsale; C-H teleoconca ventrale.

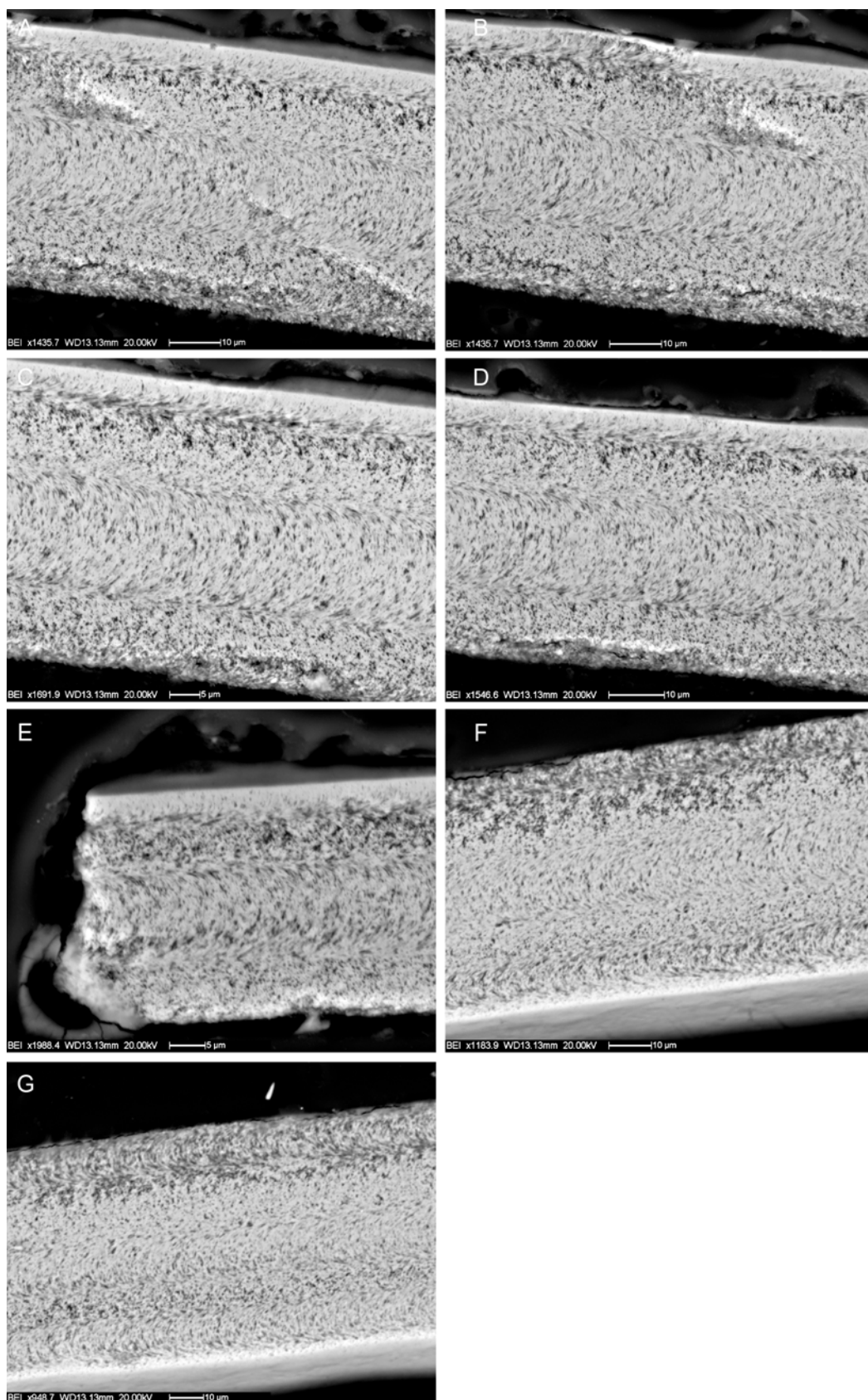


Fig. 42. Immagini SEM della teleoconca; A-E teleoconca dorsale; F-G teleoconca ventrale.

Classe C1 – T74-65_2 (Fig. 43-50)

La sezione longitudinale dell'esemplare non espone la metà esatta del campione. Pertanto non è visibile il foro in corrispondenza della protoconca, ma la parte terminale appare continua.

La parte terminale della conchiglia presenta una struttura quasi intatta, ad eccezione dello strato più interno, che mostra un diradamento delle fibre (Fig. 43A, F). La microstruttura è costituita da 5 strati formati da prismi aragonitici avvolti ad elica. La parete in questo punto raggiunge il massimo spessore. Gli strati sono numerati da 1 a 5 dall'esterno verso l'interno.

Dalla parte terminale proseguendo lungo il lato dorsale si nota il distacco del 5° strato (Fig. 43F-H) e l'intaccamento del 4° strato (Fig. 44A-E). Nella figura 44F si nota anche una rottura del 1° strato.

I prismi aragonitici si disgregano progressivamente proseguendo verso la parte centrale dello pteropode, in corrispondenza della zona in cui inizia il riempimento (Fig. 45A). In questa zona la parete della teleoconca dorsale appare più sottile e compatta, più o meno fratturata e interessata da fori (Fig. 45A,F,H) sono visibili i frammenti che compongono il riempimento (Fig. 45G), tra cui anche resti di altri organismi, come ad esempio foraminiferi planctonici (Fig. 45C, E e 46B-D). Dalla figura 47F procedendo verso la parte apicale, si nota la formazione di nuove fratture, in particolare si forma una profonda frattura mediana, probabilmente tra il 4° e il 3° strato (Fig. 47G-H, Fig. 48A-B). Verso la parte apicale della teleoconca dorsale si nota una frattura e un solco profondi in Fig. 48G e 49A.

Dalla parte terminale proseguendo lungo il lato ventrale si nota il distacco dello strato interno (Fig. 44A-H) e contemporaneamente si crea una frattura lungo la sottile parete che separa lo strato più esterno da quello ad esso adiacente (Fig. 44A-H). La parete della teleoconca ventrale si assottiglia progressivamente dalla parte terminale a quella apicale, a causa del distacco dei primi due strati esterni.

Verso la parte apicale della teleoconca ventrale c'è un evidente segnale di corrosione che ha rimosso gran parte della parete esterna del guscio (Fig. 49C). La dissoluzione avviene attraverso l'infiltrazione delle acque, che circolano negli interstizi del sedimento del riempimento.

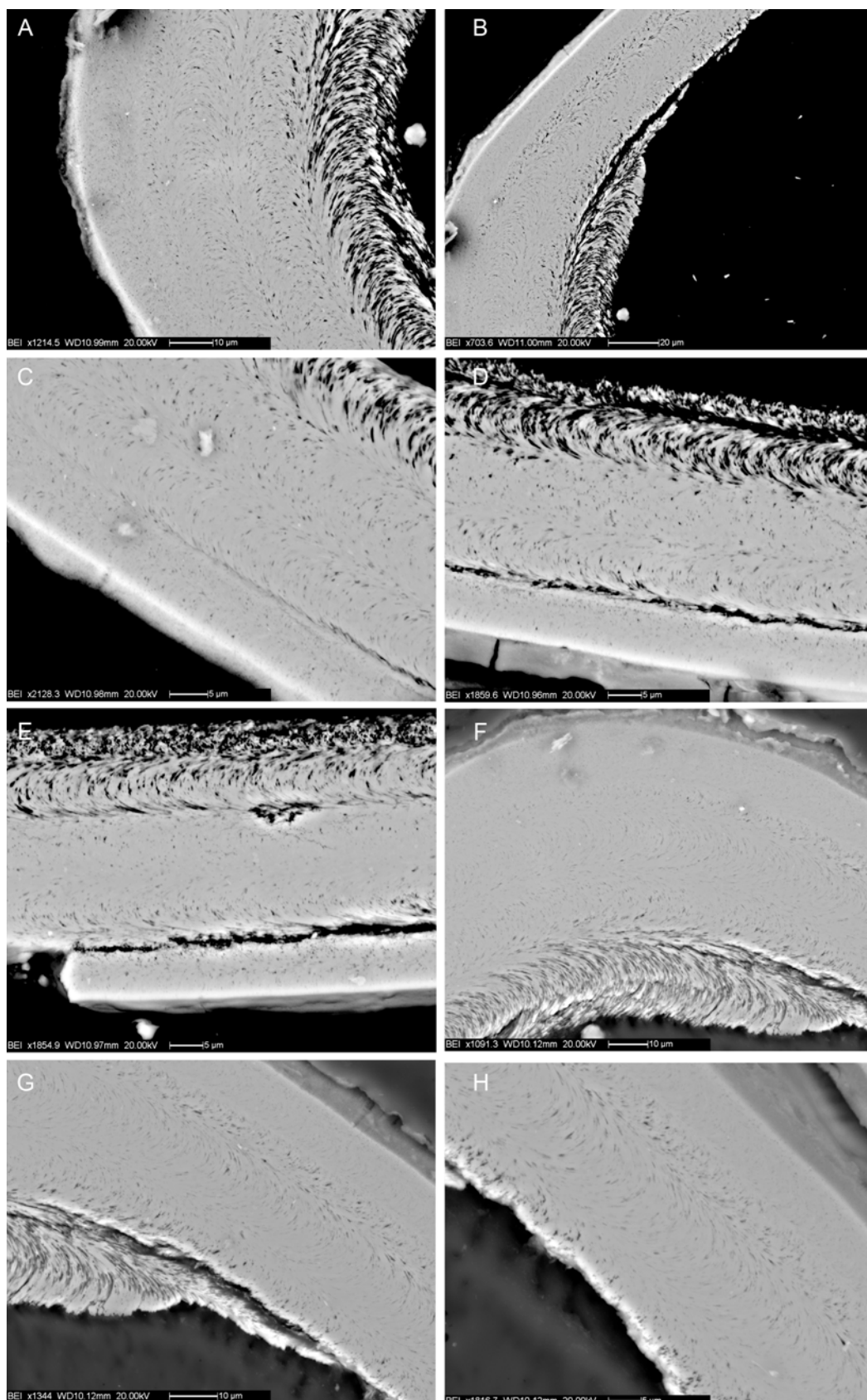


Fig. 43. Immagini SEM della protoconca A-B, F-H; A-E teleconca inferiore ventrale C-E.

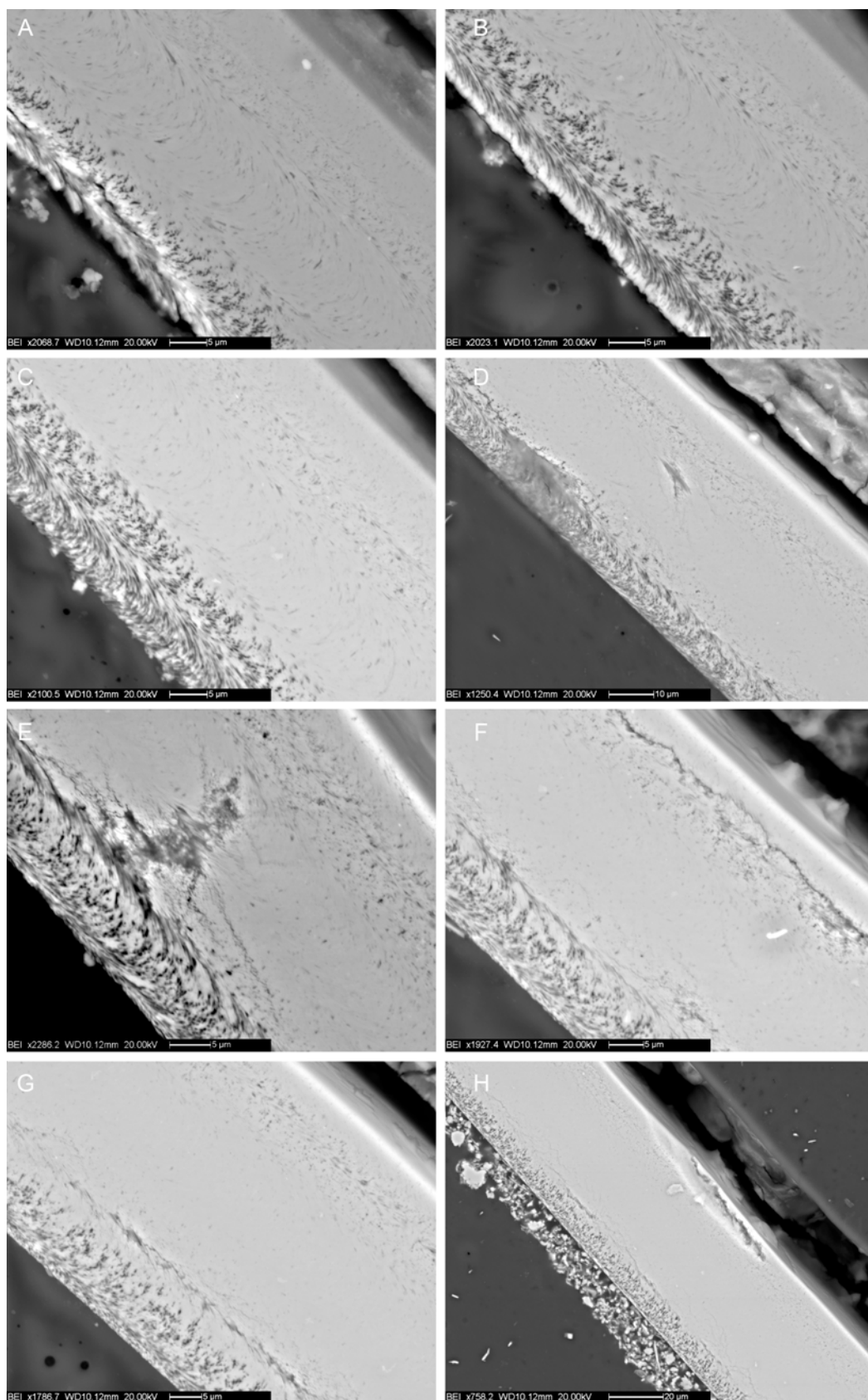


Fig. 44. Immagini SEM della teleoconca dorsale dalla parte terminale (A) verso la centrale (H).

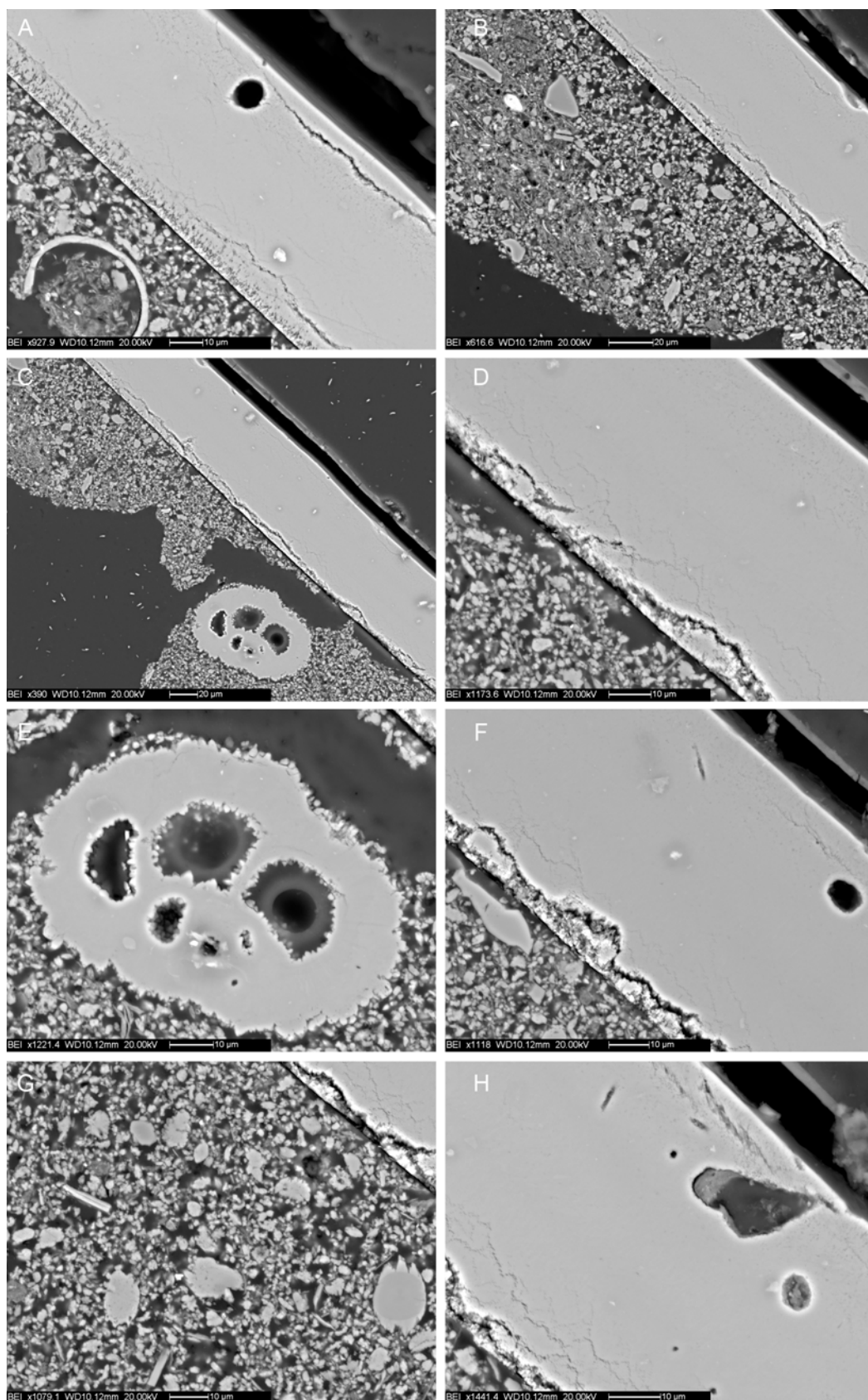


Fig. 45. Immagini SEM della teleconca dorsale e del riempimento. Da notare la sezione di un foraminifero planctonico in C, E e la matrice del riempimento costituita da frazioni argillose e bioclastiche (G).

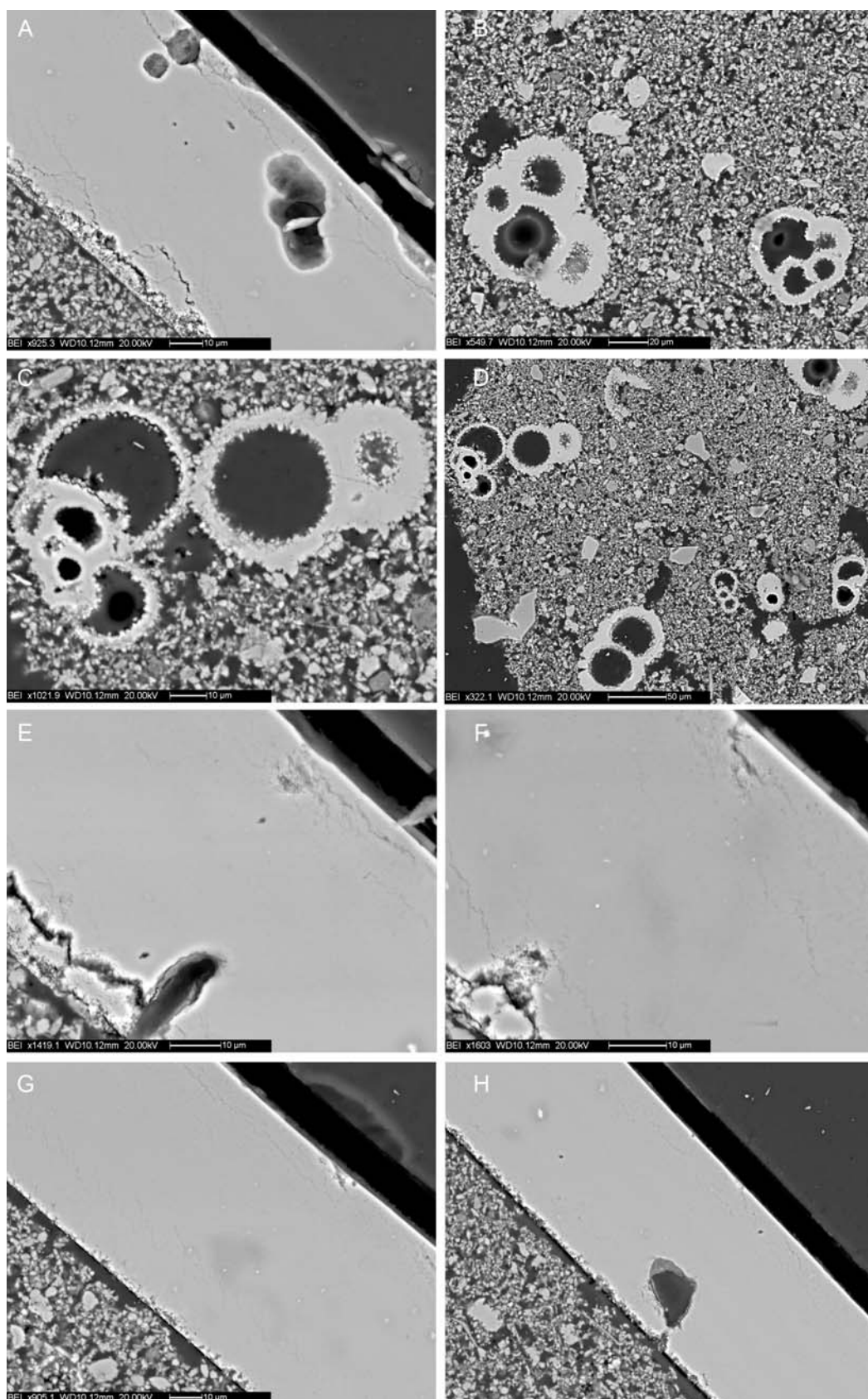


Fig. 46. Immagini SEM della teleconca dorsale e del riempimento. Da notare in E, H una forma vacuolare dovuta a dissoluzione interna al guscio.

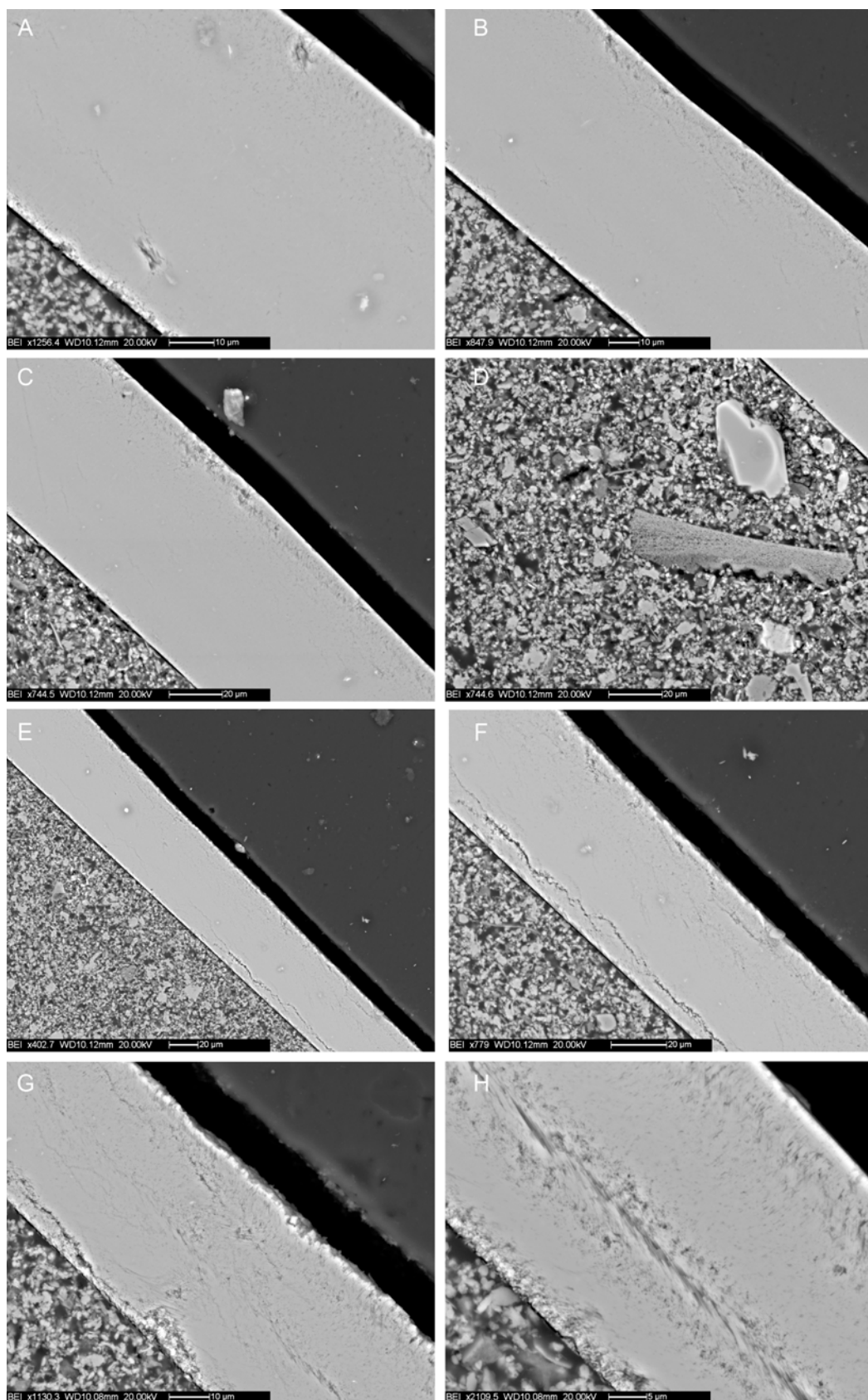


Fig. 47. Immagini SEM della teleoconca dorsale e del riempimento.

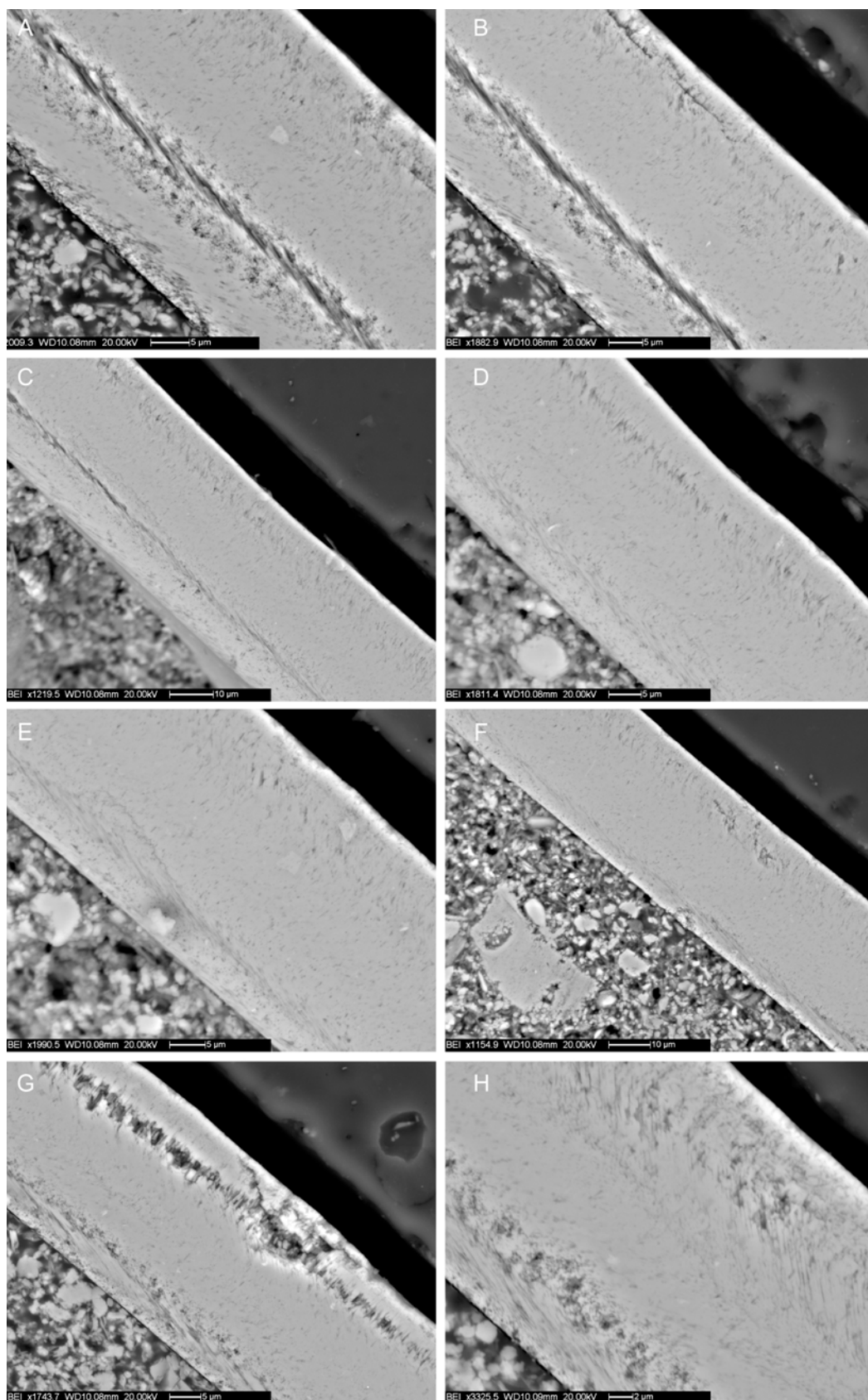


Fig. 48. Immagini SEM della teleoconca dorsale e del riempimento.

La conchiglia del campione T74-65_2 mostra un livello di conservazione diverso in corrispondenza delle zone con riempimento e di quelle con i vuoti. In particolare in corrispondenza delle aree non soggette a riempimento la conchiglia è maggiormente conservata, con la parete aragonitica quasi completa, mentre in presenza di materiale di riempimento la conchiglia appare più sottile e con una microstruttura compatta, nella quale non si distinguono i prismi aragonitici, ma che presenta delle interruzioni costituite da perforazioni. La cementazione della parete può essere una conseguenza della dissoluzione, infatti può essere dovuta alla riprecipitazione delle fasi minerali disciolte.

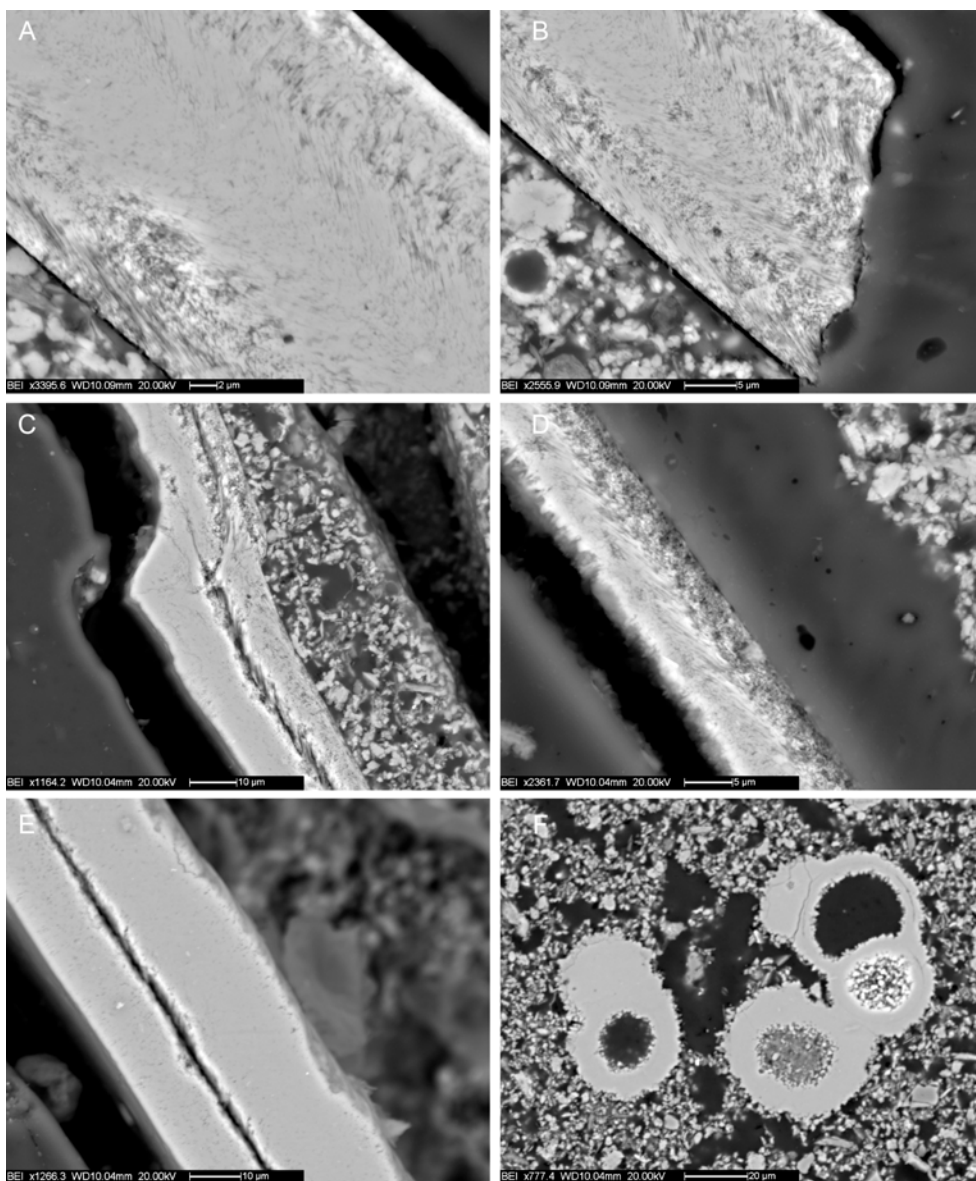


Fig. 49. Immagini SEM della teleoconca dorsale apicale (A-B); teleoconca ventrale apicale (C-E) e riempimento (F).

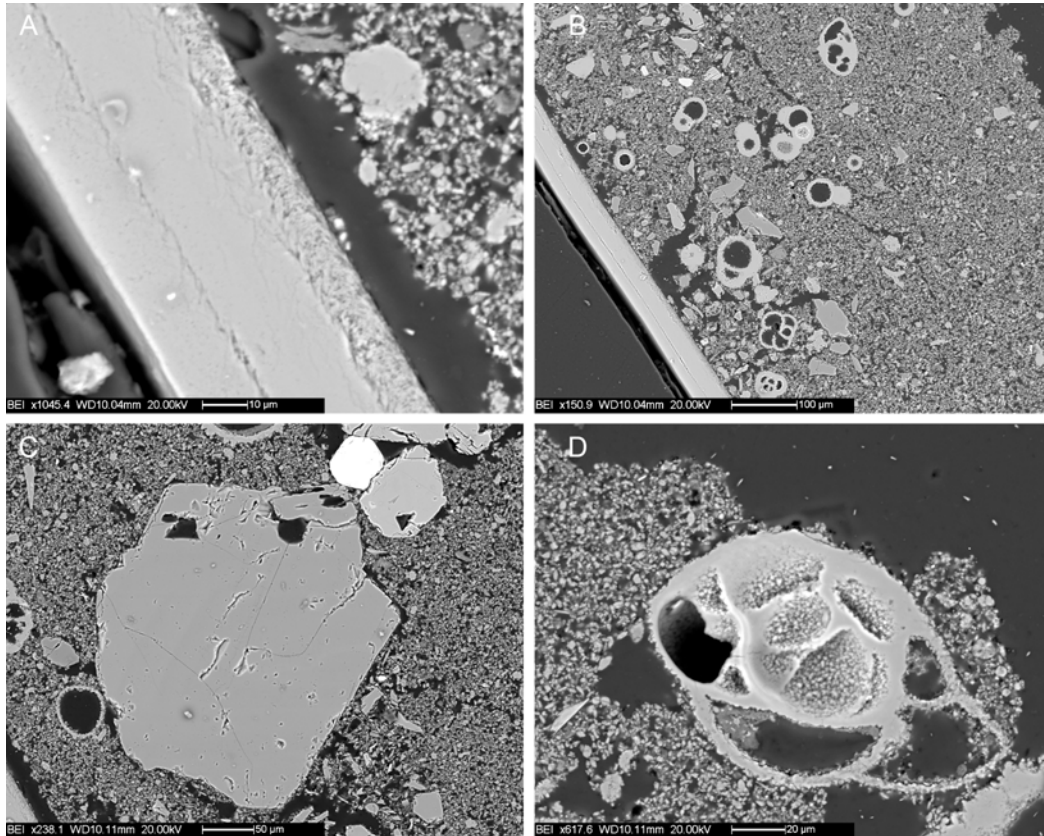


Fig. 50. Immagini al SEM del riempimento (teloconca ventrale) il riempimento è caratterizzato da abbondanti foraminiferi planctonici (B), da clasti litici con morfologie cristalline (C) e da foraminiferi bentonici (D).

Classe C2 – J73-17_4 (Fig. 51-54)

Le analisi al SEM sul campione J73-17_4 permettono di indagare la microstruttura della parte terminale della teleconca, del suo riempimento e del modello interno.

La parte terminale della teleconca è caratterizzata dalla mancanza degli strati aragonitici più esterni (Fig. 51A-B, D). Proseguendo verso la porzione centrale dell'esemplare, dal lato ventrale, la parete presenta uno spessore piuttosto omogeneo ed è organizzato in 5 strati aragonitici; come per i precedenti campioni, il primo strato, quello più esterno è il più sottile e compatto, mentre il 5° strato, quello più interno, mostra un diradamento delle fibre. (Fig. 51B-H). La parete della teleconca è caratterizzata da numerose perforazioni (es. Fig. 51E), che in alcuni casi mostrano un riempimento parziale (Fig. 51C, 52E) o totale (Fig. 51A), probabilmente dovuto a riprecipitazione del materiale disciolto in precedenza (riempimento a drusa). Il tratto corrispondente alla rottura della

teleoconca, mostra gli strati intermedi della parete, che costituiscono il residuo del distacco degli strati interni ed esterni dalla parete della conchiglia (Fig. 52H). La parete dorsale della teleoconca mostra delle caratteristiche simili a quelle del lato ventrale. È da notare la corrosione degli strati più esterni in Fig. 53E-F e 54A-B e che la microstruttura, in alcuni tratti, (Fig. 53E) appare ben conservata, con la sovrapposizione dei 5 livelli aragonitici.

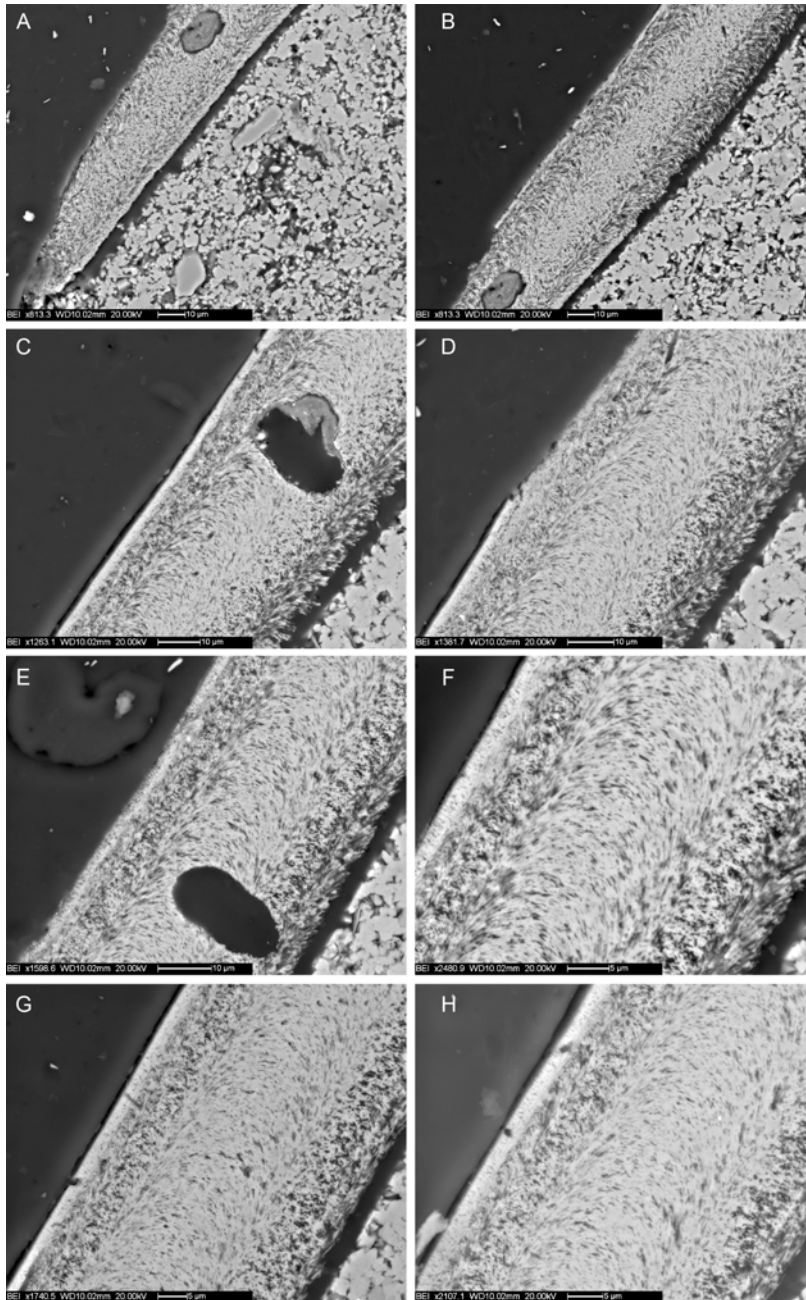


Fig. 51. Immagini SEM della teleoconca ventrale terminale.

Questo esemplare rappresenta uno stadio diagenetico più avanzato rispetto a quelli precedenti. La dissoluzione ha agito in maniera più intensa sul lato interno dello pteropode.

I fori, che attraversano la conchiglia, possono essere dovuti a corrosione o all'azione di organismi, che favorendo i processi dissolutivi, hanno creato dei percorsi preferenziali per il passaggio dei fluidi interstiziali.

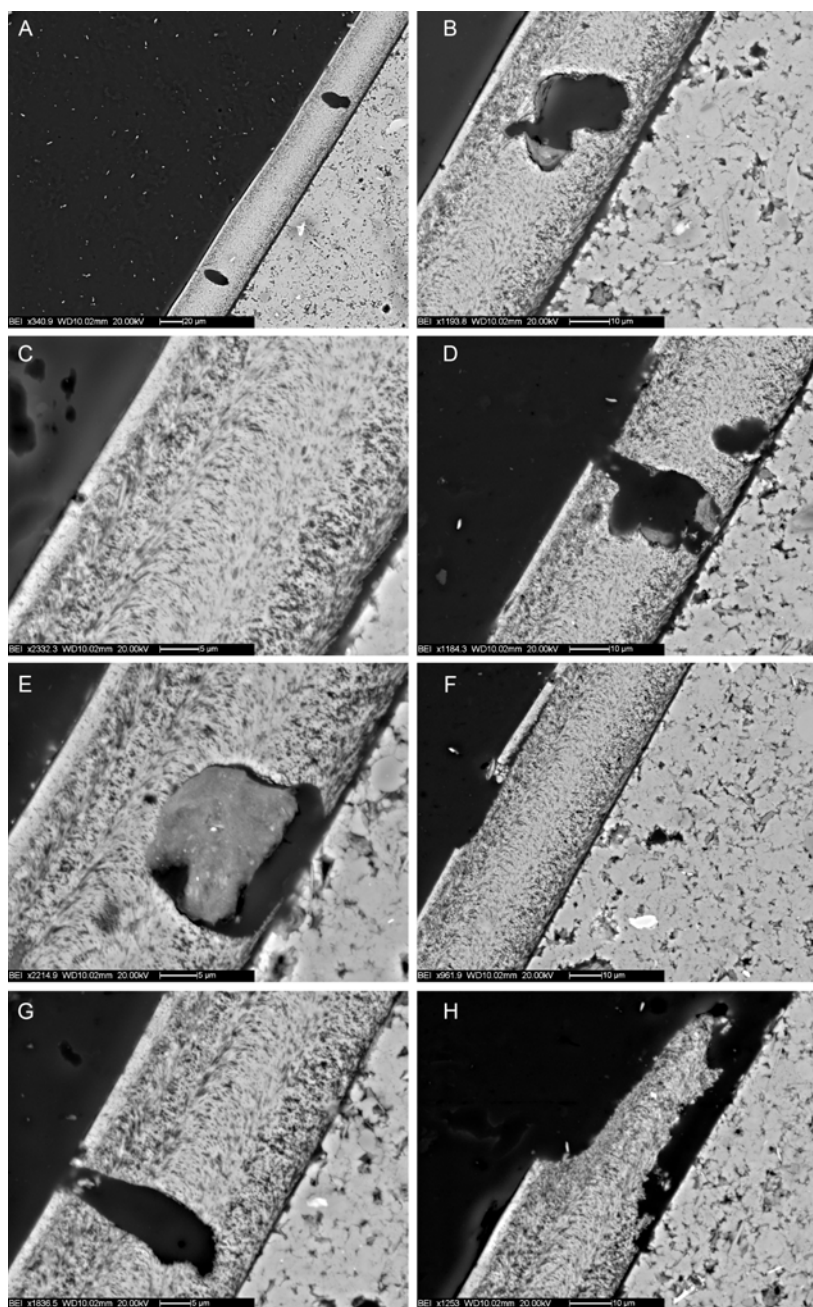


Fig. 52. Immagini SEM della teleoconca ventrale. Da notare gli evidenti segni di dissoluzione e corrosione incipiente all'interno del guscio (A-B, E) e che

intaccano la struttura esterna (C-D, F-G). La terminazione della teleoconca (F) mostra segni di corrosione sia sul lato esterno che interno.

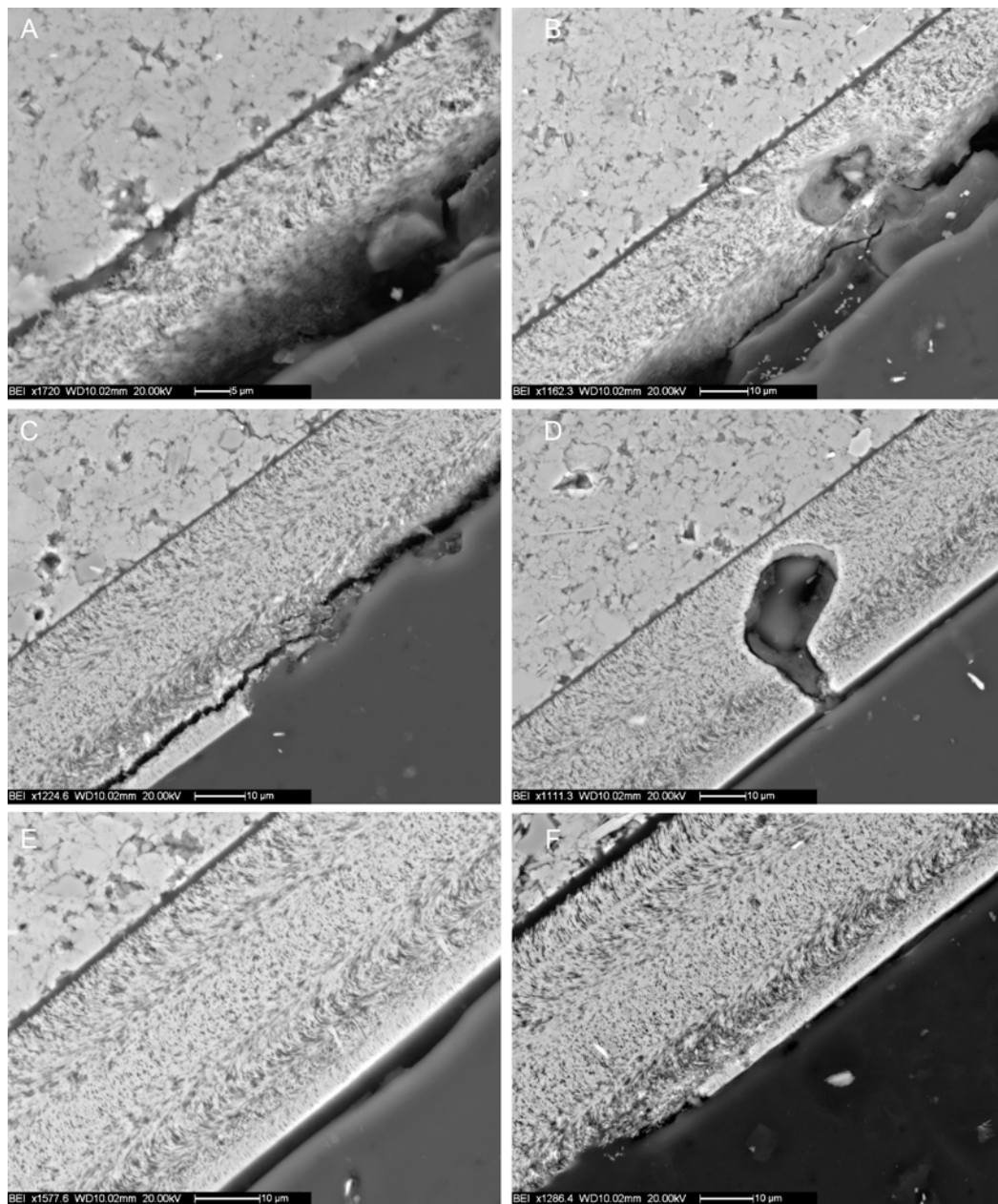


Fig. 53. Immagini SEM della teleoconca dorsale apicale. Sono evidenti i segni di dissoluzione e corrosione del guscio.

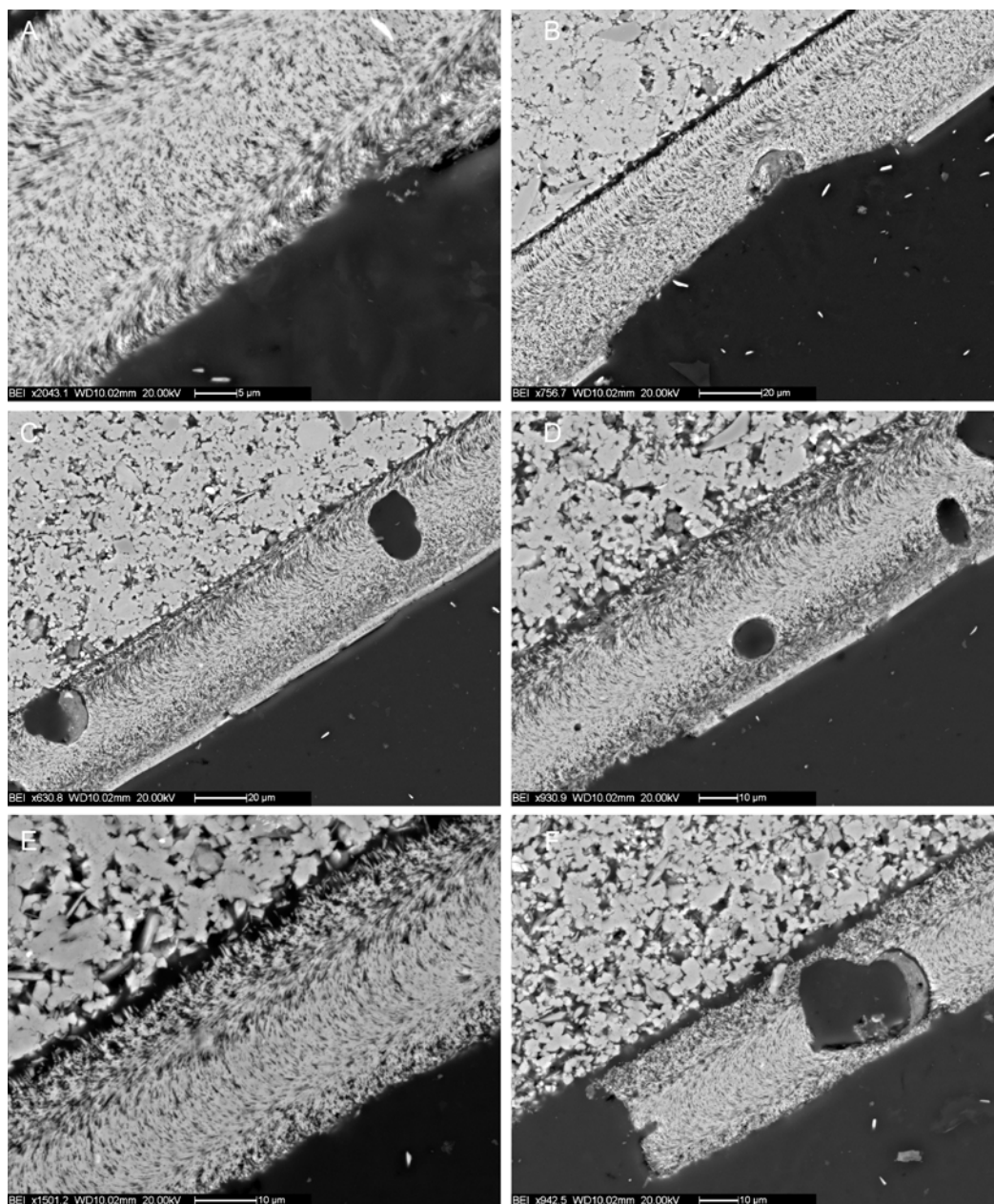


Fig. 54. Immagini SEM della teleconca dorsale, si notano evidenti segni di corrosione del guscio.

Classe D – J73-17_6 (Fig. 55-58)

L'esemplare J73-17_6 è rappresentato esclusivamente dal modello interno, che è costituito da sedimento fine e piuttosto omogeneo (micrite). Le analisi al SEM si sono concentrate principalmente sullo stato di conservazione dei due pteropodi ritrovati integri nel modello interno e appartenenti alla specie *Limacina retroversa*. I due esemplari di *L. retroversa* hanno dimensioni notevoli rispetto all'esemplare inglobante e presentano un orientamento diverso l'uno dall'altro.

Sono presenti alcuni gusci interi o frammentati di foraminiferi planctonici, che affiorano in maniera differente a livello della superficie sezionata.

I foraminiferi interni sono orientati diversamente tra loro, sulla sezione lucida affiorano diverse sezioni piane dei foraminiferi in questione.

In Fig. 55A è rappresentato il primo foraminifero, del quale si osservano le due camere interne, quella più a sinistra è vuota, mentre l'altra è completamente riempita da prismi cristallini questi sono interpretati come dei riempimenti a drusa di calcite. Il guscio del foraminifero, che è costituito interamente da calcite, ha un aspetto compatto ed omogeneo e ha uno spessore elevato rispetto al diametro delle camere interne, cosa che indica una riprecipitazione di carbonati.

Il secondo foraminifero fotografato (Fig. 55B) mostra 4 camere interne, una delle quali è vuota, una è parzialmente riempita e le altre due sono completamente riempite, ma in maniera diversa. In un caso il riempimento è a drusa di calcite, mentre nell'altro caso è piuttosto eterogeneo, con granuli di dimensioni diverse e porosità elevata.

In Fig. 55C sono rappresentati due esemplari di foraminiferi planctonici, che mostrano entrambi le stesse caratteristiche e che si distinguono dal modello interno unicamente per la morfologia del loro guscio. È importante notare che i gusci dei foraminiferi non sono del tutto integri e che il riempimento interno delle camere di questi organismi mostra la stessa litologia del modello interno dello pteropode. Quest'osservazione può essere spiegata ipotizzando che il guscio si sia frantumato prima di essere inglobato all'interno dello pteropode, quindi prima della formazione del modello interno. Il foro presente sulla superficie del guscio ha permesso l'infiltrazione del sedimento (ancora incoerente) all'interno delle camere dei foraminiferi e di consolidarsi con le stesse modalità del sedimento esterno al foraminifero, conferendogli le caratteristiche del modello interno di *C.pyramidata*.

Si può notare inoltre che i riempimenti della *Limacina* sono diversi rispetto a quelli del modello interno. Si può ipotizzare quindi che la *Limacina retroversa* si trovi in uno stato diagenetico più avanzato rispetto allo pteropode esterno *C. pyramidata*, poiché si trova inglobata in un sedimento litificato, che in questo caso è proprio il modello interno dello pteropode inglobante, mentre la *C. pyramidata* è stata ritrovata all'interno di sedimenti incoerenti. Il secondo esemplare di *L. retroversa* è rappresentato in Fig. 58A, che mostra la sezione perpendicolare alla conchiglia. Anche in questo caso è ben visibile l'impronta esterna lasciata nel modello interno di *C. pyramidata*, e il guscio in stato di dissoluzione (Fig. 58D-E, F).

La diagenesi sembra aver agito internamente al campione perché entrambi gli esemplari di *L. retroversa* conservano le impronte esterne del guscio originale. Si può pensare che lo pteropode *C. pyramidata* sia in grado di creare un microambiente diagenetico all'interno della cavità della conchiglia.

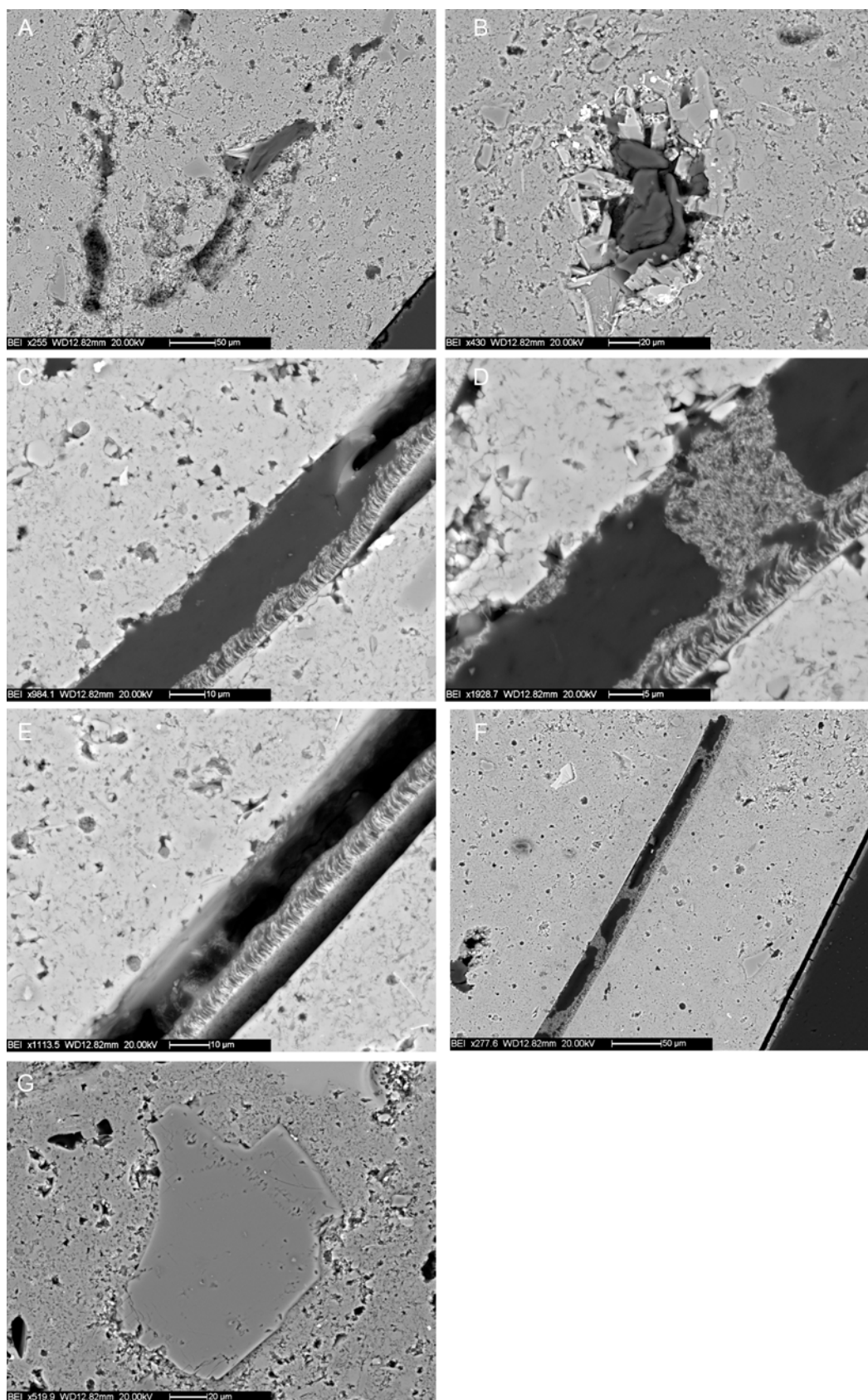


Fig. 56. Dettagli del modello interno. La frattura (C-F) sembra essere il residuo di un guscio in fase di dissoluzione, si può notare infatti al centro di esse una palizzata di prismi aragonitici.

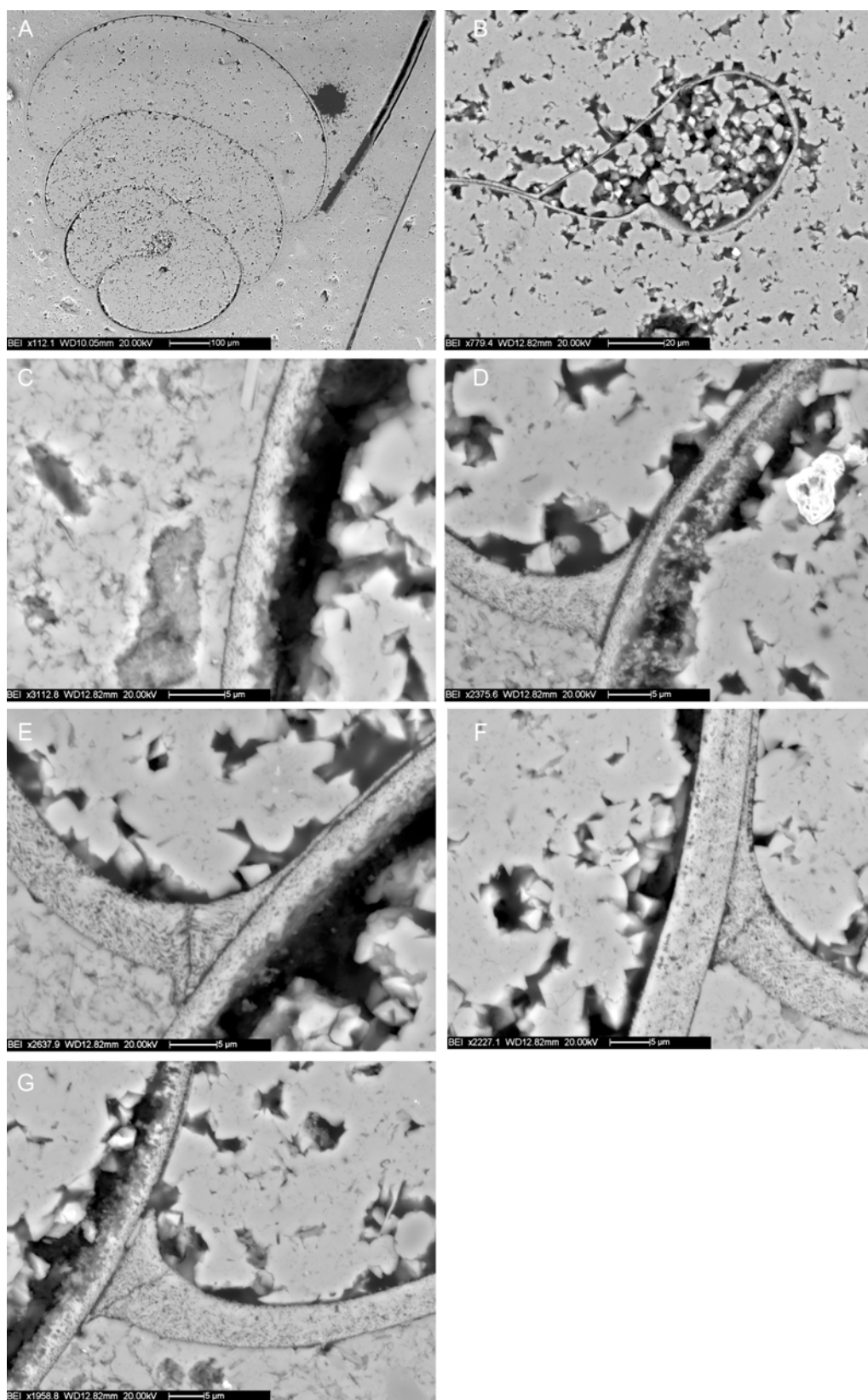


Fig. 57. Dettagli del riempimento. A, *L. retroversa*; B-G, dettagli delle suture e di altre parti della conchiglia. Il riempimento di questa conchiglia inglobata nel

modello interno di *C. pyramidata*, appare differente con morfologie cristalline (druse di calcite?).

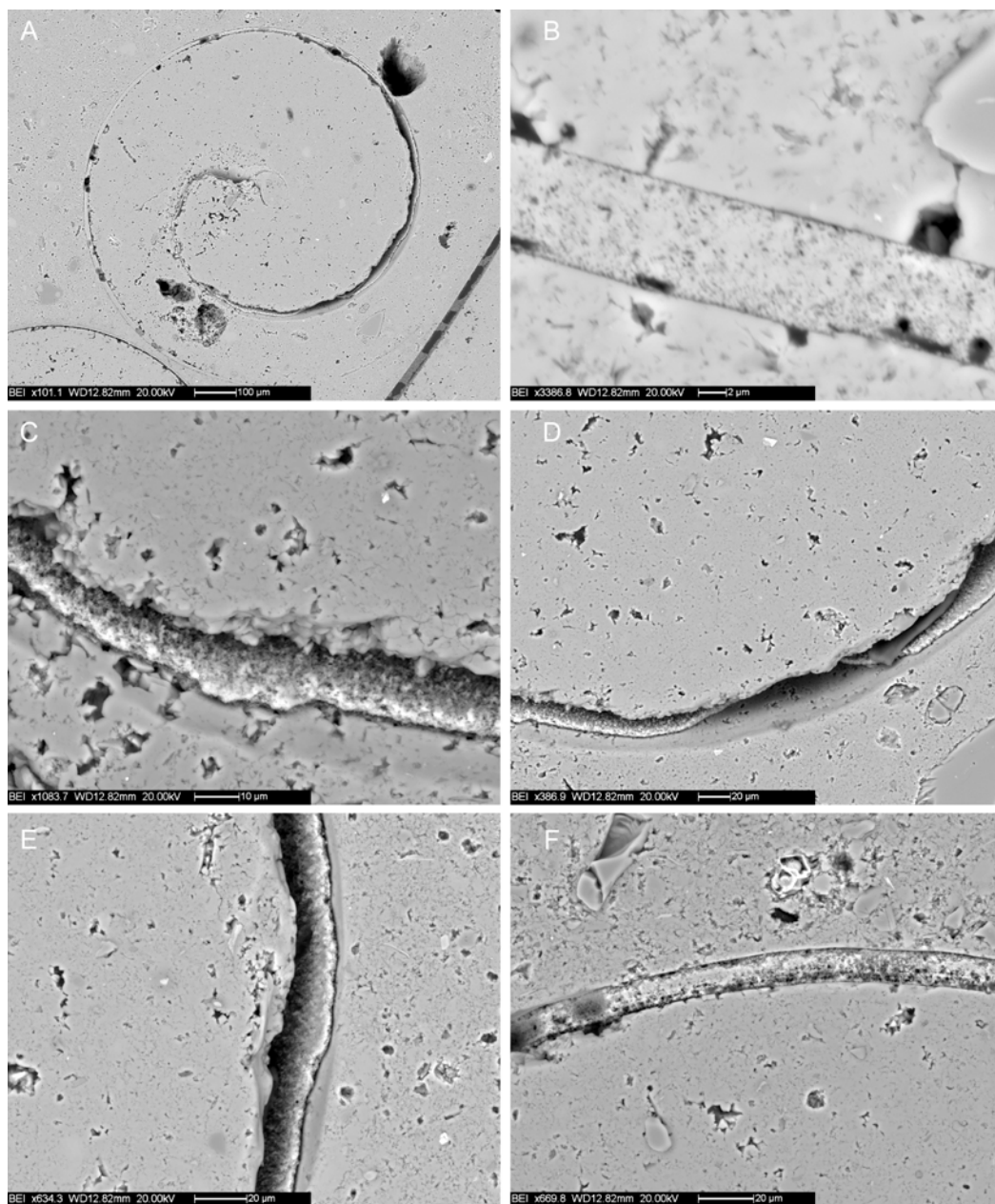


Fig. 58. Dettagli del riempimento. A, *L. retroversa*; B-F, dettagli delle suture e di altre parti della conchiglia. Il riempimento di questa seconda conchiglia inglobata nel modello interno di *C. pyramidata*, sembra essere lo stesso materiale inglobante.

4.2.1c. Il problema delle analisi chimiche dei campioni: mappe geochimiche

Le mappe geochimiche permettono di evidenziare la variazione della concentrazione degli elementi presenti all'interno di un'area predefinita di un campione. In questo caso l'obiettivo della costruzione delle mappe geochimiche è quello di individuare la variazione di alcuni elementi all'interno del primo set di campioni di *Clio pyramidata* sulla base delle classi di conservazione scelte. Sostanzialmente si vuole determinare se esiste una relazione tra la presenza di alcuni elementi chimici e la modalità di conservazione dello pteropode (o i processi diagenetici subiti).

Prima di eseguire l'analisi chimica su tutte le classi diagenetiche selezionate, è stata fatta un'indagine preliminare per individuare questo tipo di relazione. Si è scelto perciò di analizzare un campione che presentasse un'area perfettamente conservata e un'area maggiormente alterata, in particolare il primo campione della classe C1.

Dalle analisi al SEM sulla sezione lucida del campione T74-65_2 è emersa una relazione tra la presenza del riempimento e i processi dissolutivi subiti. In particolare il campione mostrava una microstruttura quasi intatta (eccetto lo strato più interno, già in fase di dissoluzione), in corrispondenza della zona terminale priva di riempimento, e una struttura più sottile e compatta (in cui non si vedono i prismi aragonitici) nella parete della zona centrale, in corrispondenza del riempimento interno (Fig. 59).

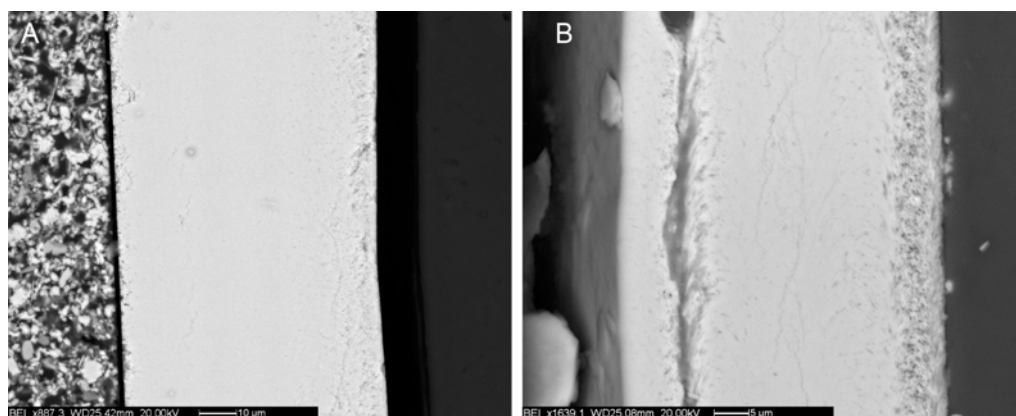


Fig. 59. L'immagine mostra i due siti del campione T74-65_2 prescelti per le mappe geochimiche. A: l'area prescelta (circa Fig. 47A) comprende sia il guscio

che parte del riempimento (in figura sulla sinistra). B: area di indagine scelta (circa Fig. 43D) su una parte del guscio.

Una volta individuate le aree in questione, sono state costruite le mappe geochimiche dei seguenti elementi: Ca, Mg, Sr, Mn, K, S. Ci si aspetta che il calcio abbia una concentrazione chimica omogenea nel guscio di tutti i campioni in questione, mentre alcuni degli altri elementi, in particolare Sr, Mg e Mn, potrebbero presentare delle variazioni di concentrazione a seconda del livello diagenetico. Il magnesio e lo stronzio potrebbero rivelare l'esistenza di una sostituzione dell'aragonite con la calcite. Infatti questi due elementi hanno valori diversi nei due polimorfi: il magnesio può essere facilmente ritrovato all'interno dei cristalli di calcite, al posto del catione Ca^{2+} . Lo stronzio invece è un catione di dimensioni maggiori rispetto a Mg^{2+} e mostra un discreto margine di sostituibilità isomorfa con il catione Ca^{2+} all'interno del reticolo cristallino dell'aragonite.

Le mappe geochimiche ottenute non hanno registrato delle variazioni apprezzabili nella concentrazione degli elementi considerati (Fig. 60 e 61).

Questo risultato dipende probabilmente dall'omogeneità della conchiglia aragonitica degli pteropodi. La presenza di eventuali variazioni chimiche, considerato anche l'esiguo spessore della parete della conchiglia, potrebbe essere al di sotto del limite di rilevabilità dello strumento.

Pertanto si può affermare che le mappe geochimiche effettuate attraverso EDAX non rappresentano uno strumento adeguato per lo studio degli esoscheletri degli pteropodi dal punto di vista chimico, mentre si rivelano adatte per la caratterizzazione geochimica di altri organismi, come ad esempio i coralli.

L'eventuale presenza di differenze geochimiche all'interno della conchiglia degli pteropodi dovrebbe essere valutata attraverso l'utilizzo di metodologie di analisi più sofisticate, come ad esempio il NanoSIMS, che consente di analizzare gli elementi in traccia con una risoluzione spaziale più elevata, dell'ordine del nanometro e con maggiore sensibilità analitica.

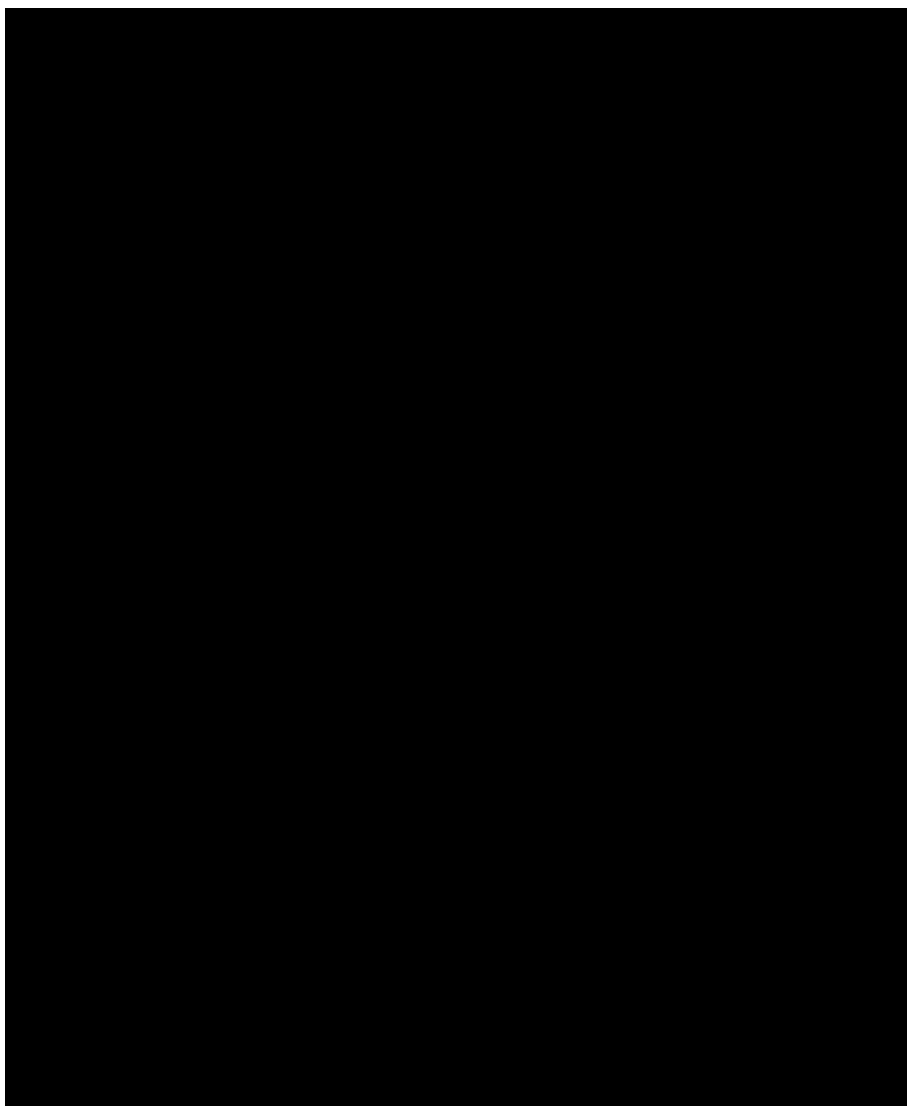


Fig. 60: Mappa geochimica effettuata sulla sezione del campione T74-65_2. come si vede dall'omogeneità del risultato, il campione non ha differenze significative nella composizione chimica e non è possibile estrapolare nessuna indicazione utile per la caratterizzazione del riempimento del campione.

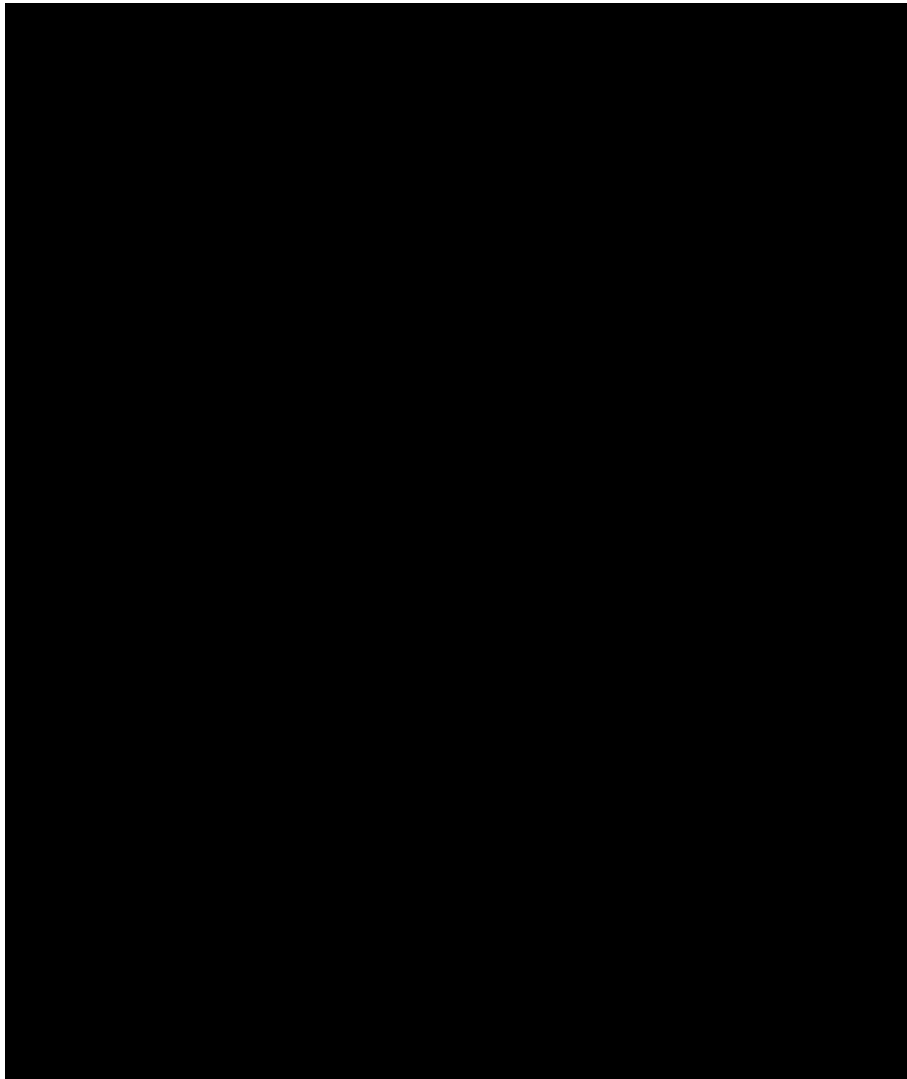


Fig. 61: Mappa geochimica effettuata sulla sezione del campione T74-65_2. Come per il precedente esempio le mappe dei sei campioni analizzati non mostrano variazioni nella composizione chimica.

4.2.2 Analisi morfologiche

I campioni utilizzati per le analisi morfologiche al microscopio a scansione sono esemplari integri della specie *Clio pyramidata*, appartenenti a diverse classi di preservazione. Nel caso dell'analisi morfologica al SEM si sfrutta il *detector* degli elettroni secondari per valutare l'aspetto tridimensionale delle strutture aragonitiche. Lo scopo di quest'analisi è da una parte quello di valutare il grado di alterazione della superficie interna e di quella esterna del campione, e dall'altra di analizzare la microstruttura della conchiglia in corrispondenza di una frattura, praticata parallelamente alle piastre dorso-ventrali della conchiglia. L'operazione di frammentazione del guscio è un espediente che consente di analizzare la microstruttura interna del campione evitando gli artefatti dovuti alla consunzione e alla manipolazione del campione e di confrontarla con la superficie esposta alle alterazioni ambientali.

Classe A – T74-65_1 bis

L'esemplare T74-65_1 bis è stato frammentato lungo il lembo sporgente della piastra ventrale. L'analisi al SEM della frattura 'fresca' ha messo in luce i dettagli della microstruttura aragonitica. La parete della piastra dorsale è costituita da 2 strati formati da prismi elicoidali separati da sottili pareti rigide, che presentano una disposizione diversa dei prismi aragonitici. Le fibre elicoidali che costituiscono la struttura sono rivolte verso la parte superiore dell'apertura (es. Fig.1A). La frattura fresca mette bene in risalto la posizione dei prismi e il loro orientamento sporgente, con la concavità verso l'alto (fig.3A, E-G). Nonostante la microstruttura dell'esemplare analizzato sia ben conservata e non intaccata dai meccanismi di dissoluzione, si notano dei lievi solchi o strutture scavate (*scarred structure*) (Fig. 3A, D; 4F; 5D, E; 6E) sulla superficie esterna della piastra dorsale del campione e sporadiche strutture a forma di cavolfiore o *cauliflower heads* (Fig. 3B, D); sono presenti inoltre rari segnali di perforazione (Fig. 6 B), solchi più profondi in corrispondenza degli spigoli laterali (Fig. 6A) e l'esfoliazione della superficie in prossimità della parte terminale della teleoconca, nella zona in cui è avvenuto il distacco della protoconca.

La frattura 'esposta' è rappresentata dalle porzioni della conchiglia non fratturate meccanicamente, che sono state sottoposte ad alterazioni chimico-fisiche in

condizioni naturali. Al contrario di quella fresca, la frattura esposta, presenta una superficie molto levigata, attraverso la quale non è possibile determinare l'organizzazione dei prismi aragonitici (Fig. 5C)

Classe B – J73-17_2bis

L'esemplare è stato fratturato nella parte centrale della parete dorsale, il frammento ottenuto è stato diviso a metà.

La superficie della frattura mostra l'organizzazione della microstruttura della parete. Gli strati interni mostrano una disposizione ad elica, mentre le pareti esterne sono notevolmente assottigliate (es Fig. 32). La frattura centrale della parete dorsale in alcuni punti mostra una fogliettatura, che espone i prismi dello strato esterno (Fig.29) L'aspetto fogliettato è visibile anche in altre zone della conchiglia, non necessariamente in corrispondenza della frattura fresca, ad esempio una struttura simile si può osservare all'estremità in alto a sinistra della parete dorsale (Fig.12). Le strutture fogliettate mostrano che i prismi che compongono la parete esterna sono più assottigliati rispetto a quelli dell'esemplare della classe precedente. Ad esempio confrontando la fogliettatura della parete esterna della parte terminale della teleoconca (in corrispondenza della frattura della protoconca) (Fig.9) con la stessa zona dell'esemplare precedente, i prismi appaiono più sottili e dall'aspetto 'sfilacciato', mentre l'esemplare T74-65_1 bis espone dei prismi più spessi e dalla forma regolare (Fig. 6C). Questa caratteristica dimostra l'esistenza di una differenza micro strutturale, tra i campioni della classe A e di quelli della classe B, oltre che morfologica (aspetto ialino /aspetto opaco della conchiglia).

Sulla superficie della frattura, sul lato destro della parete dorsale, sono visibili due diverse strutture, una, quella più in alto è molto simile alle *cauliflower heads* osservate nell'esemplare T74-65_1 bis, l'altra è un foro, ma può essere dovuto al distacco di una struttura a forma di cavolfiore durante la frattura (Fig. 31).

Sulla superficie della conchiglia sono visibili sporadiche incrostazioni, dei piccoli solchi (che in qualche caso attraversano obliquamente le strutture prismatiche (es Fig. 31) e strutture scavate più o meno profonde (Fig 11), che consistono nell'asportazione della sottile parete esterna.

Sono stati analizzati anche i singoli frammenti, entrambi disposti con la superficie interna rivolta verso l'alto (Fig. 22). In questo modo è possibile analizzare la

superficie interna della parete dorsale. Su questo lato è visibile la struttura della parete interna, che è costituita da prismi di aragonite disposti parallelamente tra loro (Fig. 11, 13 per il primo frammento e 17, 19, 21 per il secondo frammento)

La frattura sul lato sinistro del primo frammento è avvenuta lungo una direzione preferenziale, parallela alla piega dorsale dello pteropode, ciò spiega la sua geometria rettilinea. Tale frattura mostra i due strati prismatici esterni aragonitici. Le pareti esterne che lo racchiudono sono molto sottili in questo esemplare. Si può pensare quindi che in questa modalità di preservazione (classe B) la dissoluzione agisca con l'intaccamento e assottigliamento della parete esterna che porta all'esposizione dei prismi aragonitici (Fig.2, 4).

Proseguendo verso il basso lungo la frattura si incontra un tratto in cui è esposto gran parte dello strato prismatico, con la sua caratteristica forma elica (Fig. 4-6).

Sul lato interno di entrambi i frammenti sono visibili delle incrostazioni (Fig. 7-10 per il primo frammento; 16, 20 per il secondo frammento).

Classe C1 – T74-65_2 bis

Il campione è stato frammentato asportando una porzione della piastra ventrale, in un punto di debolezza della stessa. Il primo frammento analizzato (Fig.4, 10) è disposto con il lato esterno rivolto verso l'alto, mentre il secondo espone la parete interna (Fig.1.). I dettagli (Fig. 1, 5) della frattura mettono in luce il distacco della parete esterna e i prismi aragonitici sottostanti.

La parete interna del secondo frammento mostra la disposizione parallela dei prismi aragonitici (Fig. 23-25) e, in qualche punto, dei piccoli solchi derivanti dalla scavatura dello strato più interno (Fig. 25, 28, 30). Sono presenti anche delle strutture dovute all'esfoliazione della parete interna in maniera più superficiale rispetto ai solchi, ma più estesa spazialmente (29, 31). In quest'ultimo caso le parti esposte mostrano delle fibre corte e molto assottigliate.

È da notare che in prossimità della frattura le fibre che costituiscono lo strato esterno sono molto assottigliate, 'sfilacciate' e 'appiattite', tanto da far dimenticare la loro struttura prismatica. Sulla parete interna sono presenti sporadicamente delle incrostazioni, che probabilmente costituiscono il residuo del riempimento con cui il frammento si trovava a contatto.

La parete esterna del terzo frammento (Fig.2) è esposta verso l'alto e mostra una superficie levigata con qualche piccolo solco (Fig.7) e qualche incrostazione

esterna (Fig.7, 9). In prossimità della frattura si vedono le fibre assottigliate della parete esterna, simili a quelle presenti sulla parete interna, ma meno alterate. La rimozione della parete esterna mette in evidenza i prismi aragonitici sottostanti (Fig. 5, 8). Il quarto frammento analizzato è disposto con la frattura verso l'alto (Fig. 12). In questo modo è possibile osservare la microstruttura completa della parete: si osservano i due strati di fibre elicoidali con uno spessore ridotto rispetto a quello degli strati interni delle classi precedenti. Inoltre in questo caso la parete esterna e quella interna sono quasi inesistenti e ciò concorda con le fibre sfilacciate osservate negli altri frammenti. Uno degli strati più interni sembra molto ben conservato, con prismi dalla forma perfettamente regolare (Fig. 13-15).

Classe D – J73-17_6bis

L'esemplare è costituito dal solo modello interno ed è molto alterato con presenza di solchi (Fig. 1, 3, 10, 12) e concrezioni superficiali (Fig. 7, 19, 20, 21).

I bordi laterali sono molto alterati, e non riproducono perfettamente i dettagli della conchiglia originale. In particolare il bordo esterno sinistro (destro nelle immagini) del modello interno presenta una struttura molto particolare, probabilmente generata da una forte corrosione, che ha levigato la superficie fino renderla dall'aspetto quasi amorfo (fig, 22-27). Tali strutture sono intervallate da concrezioni sia al di sotto sia al di sopra della loro superficie. In alcuni punti queste superfici levigate presentano delle crepe e si frammentano in maniera geometriche (Fig. 25, 26, 28).

Un'altra particolarità è la presenza di un foro molto grande all'altezza della parte apicale del modello interno. Questo foro ha all'interno delle strutture smussate simili a quelle descritte precedentemente (Fig. 35). Il modello interno in questione è una variazione rispetto all'altro della classe D, perché è molto più alterato superficialmente, l'altro presenta una superficie più liscia.

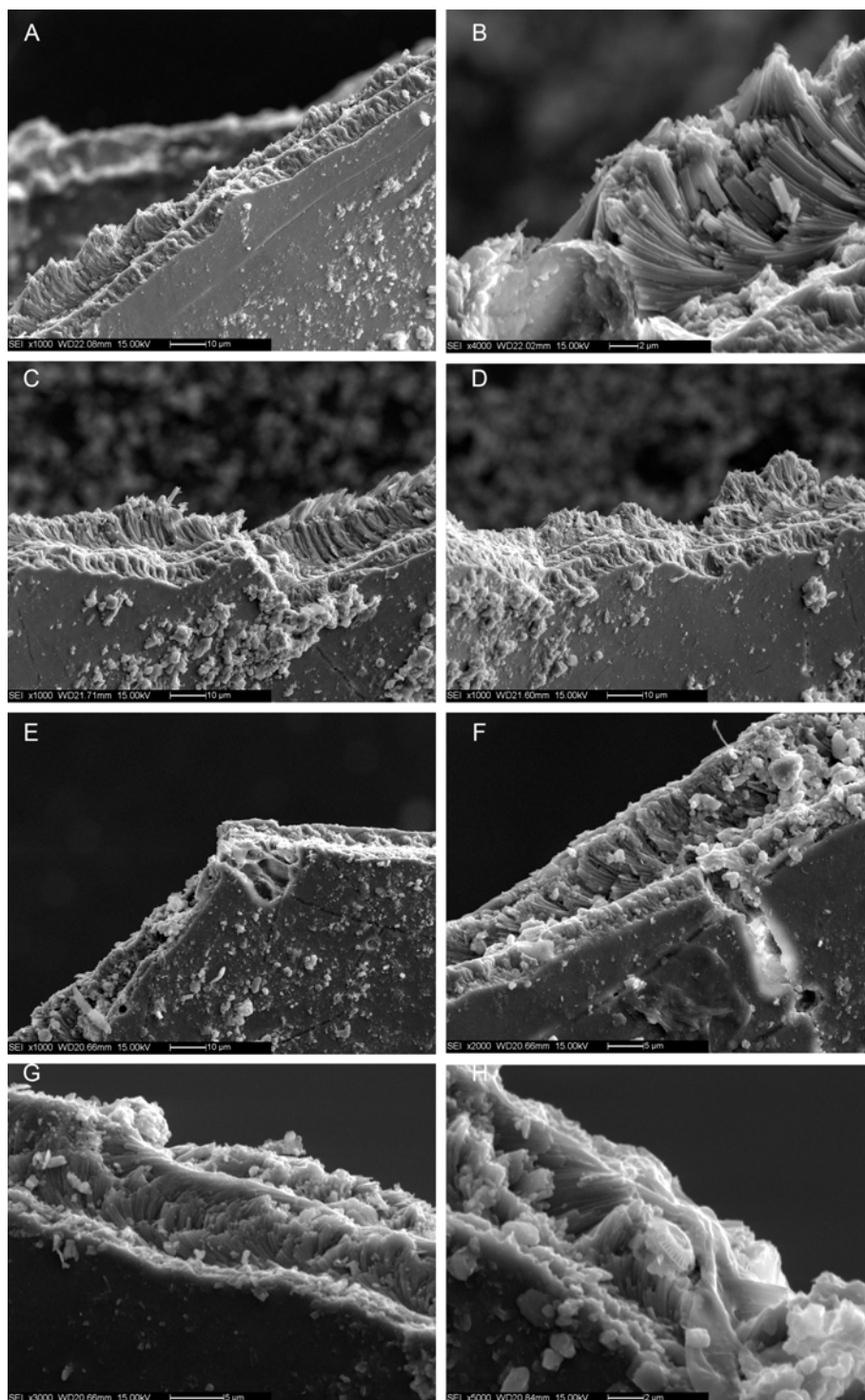


Fig. 65. Dettagli di alcuni punti della frattura fresca praticate sul lato dorsale.

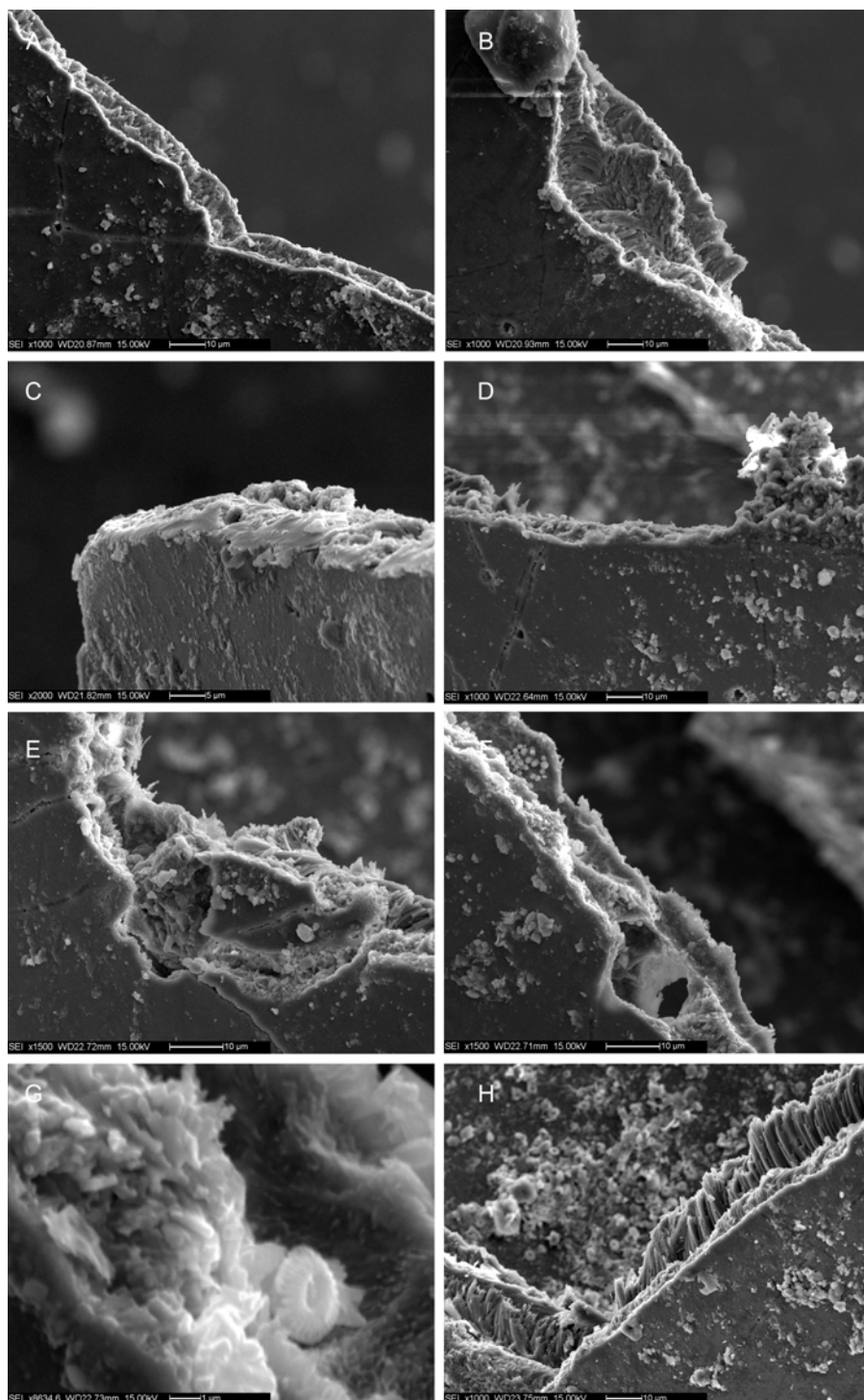


Fig. 66. Dettagli di alcuni punti della frattura fresca praticata sul lato dorsale.

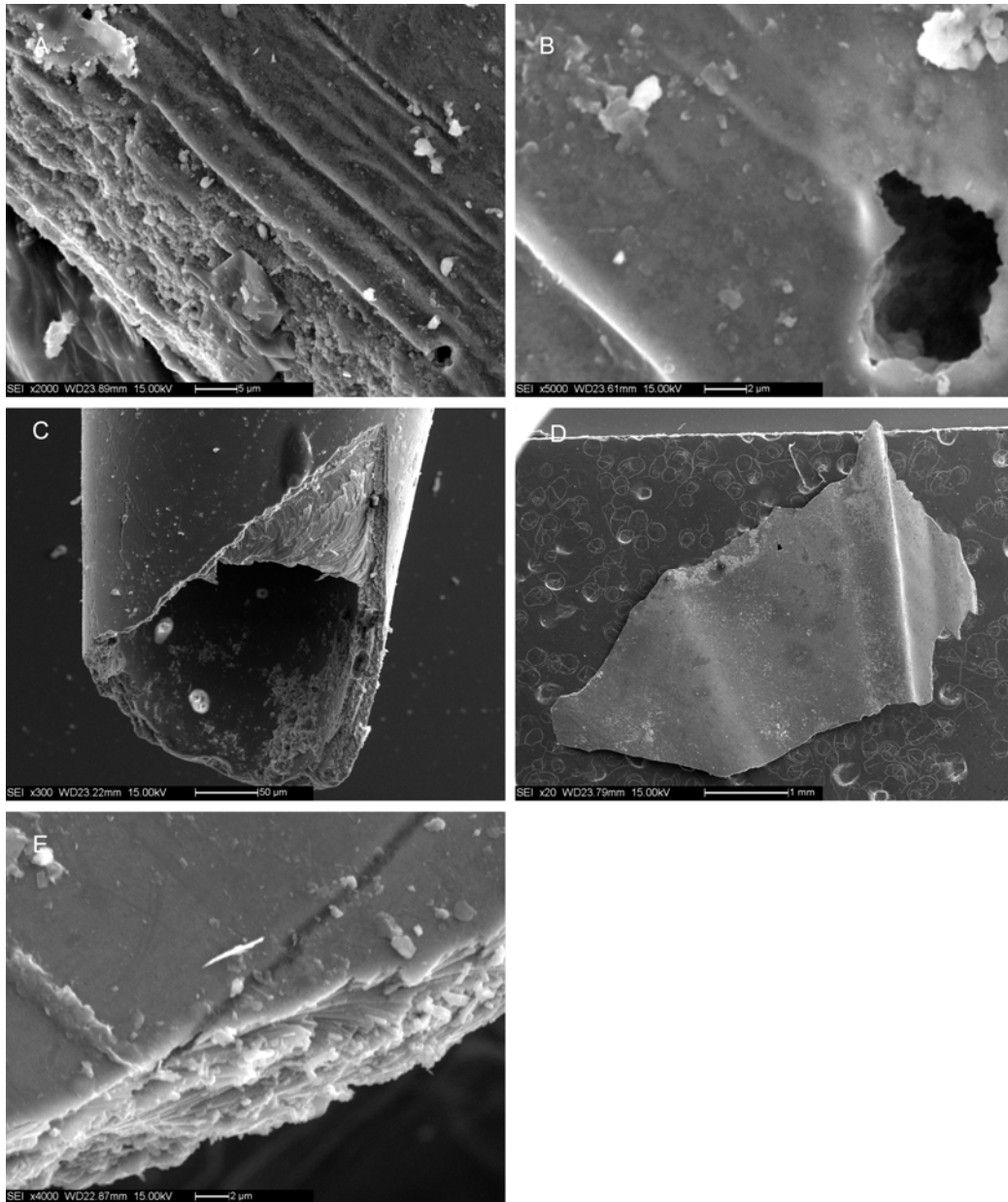


Fig. 67. Dettagli della frattura fresca praticate sul lato dorsale. C, parte terminale che mostra il punto in cui si è staccata la protoconca; D, panoramica del frammento.

La frattura ‘esposta’ è rappresentata dalle porzioni della conchiglia non fratturate meccanicamente, che sono state sottoposte ad alterazioni chimico-fisiche in condizioni naturali. Al contrario di quella fresca, la frattura esposta, presenta una superficie molto levigata, attraverso la quale non è possibile determinare l’organizzazione dei prismi aragonitici (Fig. 66C)

L'esemplare è stato fratturato nella parte centrale della parete dorsale, il frammento ottenuto è stato diviso a metà.

La superficie della frattura mostra l'organizzazione della microstruttura della parete. Gli strati interni mostrano una disposizione ad elica, mentre le pareti esterne sono notevolmente assottigliate (es, Fig. 68C). La frattura centrale della parete dorsale in alcuni punti mostra una fogliettatura, che espone i prismi dello strato esterno (Fig. 69H) L'aspetto fogliettato è visibile anche in altre zone della conchiglia, non necessariamente in corrispondenza della frattura fresca, ad esempio una struttura simile si può osservare all'estremità in alto a sinistra della parete dorsale (Fig. 70E). Le strutture fogliettate mostrano che i prismi che compongono la parete esterna sono più assottigliati rispetto a quelli dell'esemplare della classe precedente. Ad esempio confrontando la fogliettatura della parete esterna della parte terminale della teleoconca (in corrispondenza della frattura della protoconca) (Fig. 70B) con la stessa zona dell'esemplare precedente, i prismi appaiono più sottili e dall'aspetto 'sfilacciato', mentre l'esemplare T74-65_1 bis espone dei prismi più spessi e dalla forma regolare (Fig. 67C). Questa caratteristica dimostra l'esistenza di una differenza micro strutturale, tra i campioni della classe A e di quelli della classe B, oltre che morfologica (aspetto ialino /aspetto opaco della conchiglia).

Sulla superficie della frattura, sul lato destro della parete dorsale, sono visibili due diverse strutture, una, quella più in alto è molto simile alle *cauliflower heads* osservate nell'esemplare T74-65_1 bis, l'altra è un foro, ma può essere dovuto al distacco di una struttura a forma di cavolfiore durante la frattura (Fig. 68B).

Sulla superficie della conchiglia sono visibili sporadiche incrostazioni, dei piccoli solchi (che in qualche caso attraversano obliquamente le strutture prismatiche (es Fig. 68B) e strutture scavate più o meno profonde (Fig 70D), che consistono nell'asportazione della sottile parete esterna.

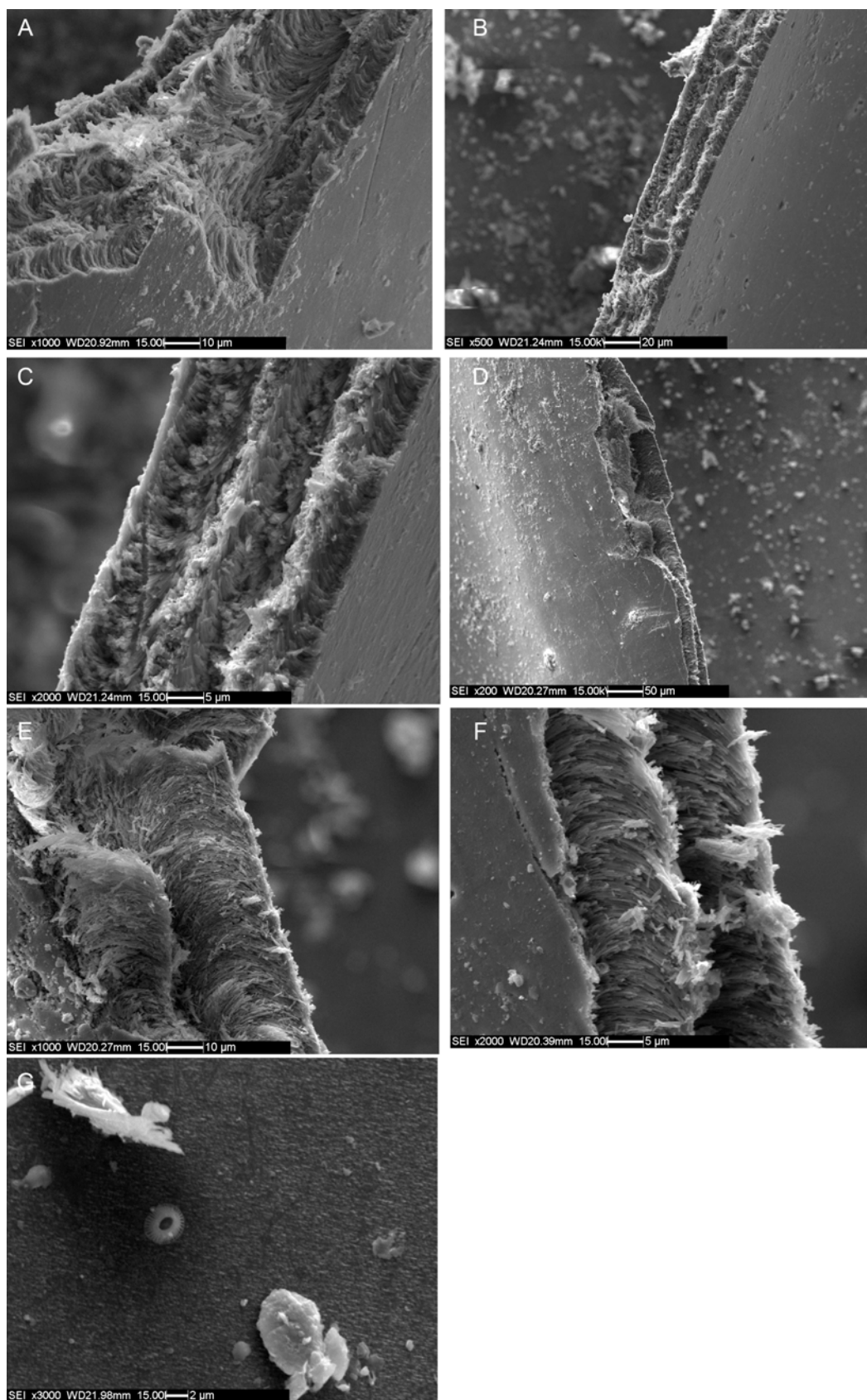


Fig. 68. Dettagli di alcuni punti della frattura fresca praticata sul lato dorsale.

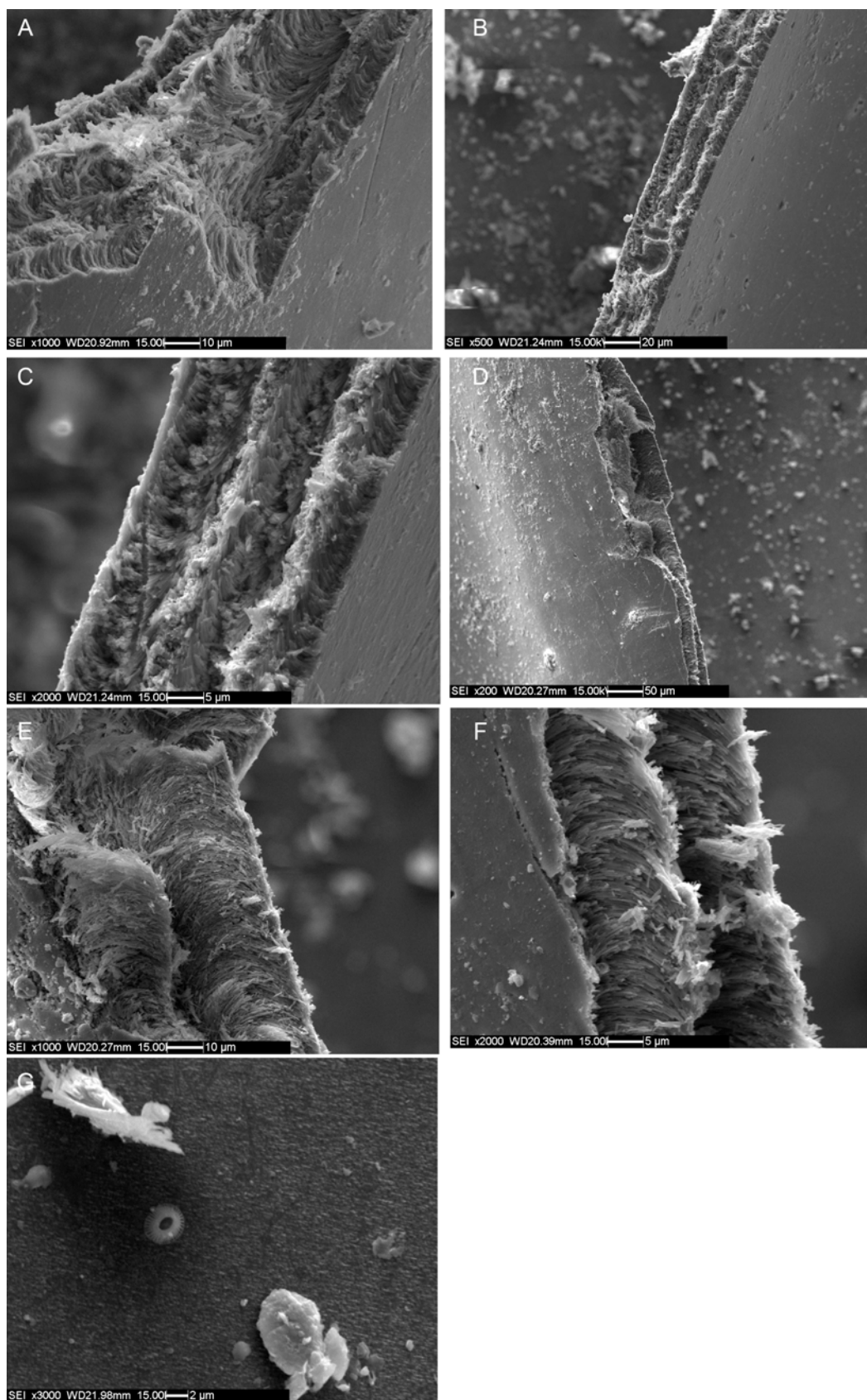


Fig. 68. Dettagli di alcuni punti della frattura fresca praticata sul lato dorsale.

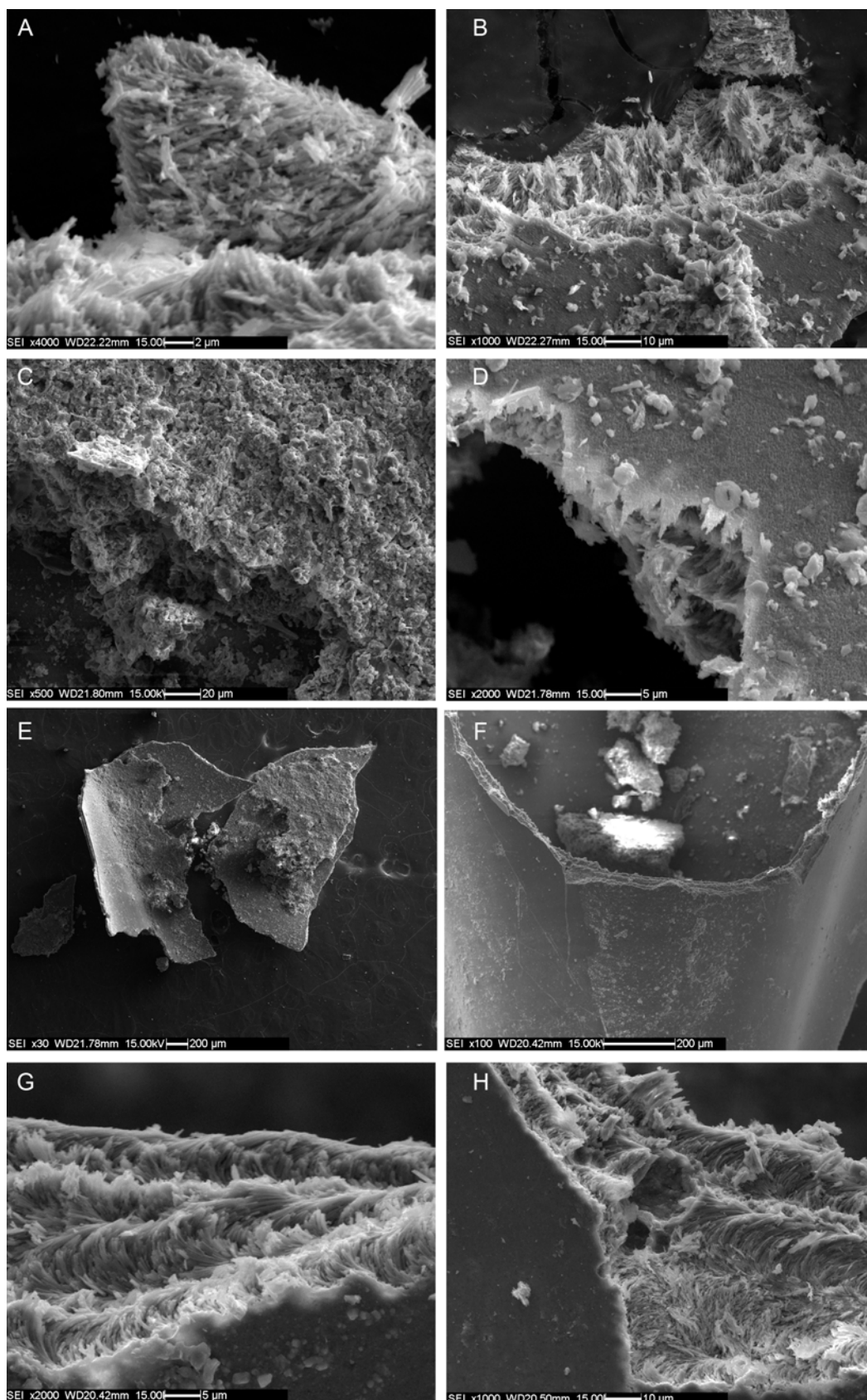


Fig. 69. Dettagli di alcuni punti della frattura fresca praticata sul lato dorsale.

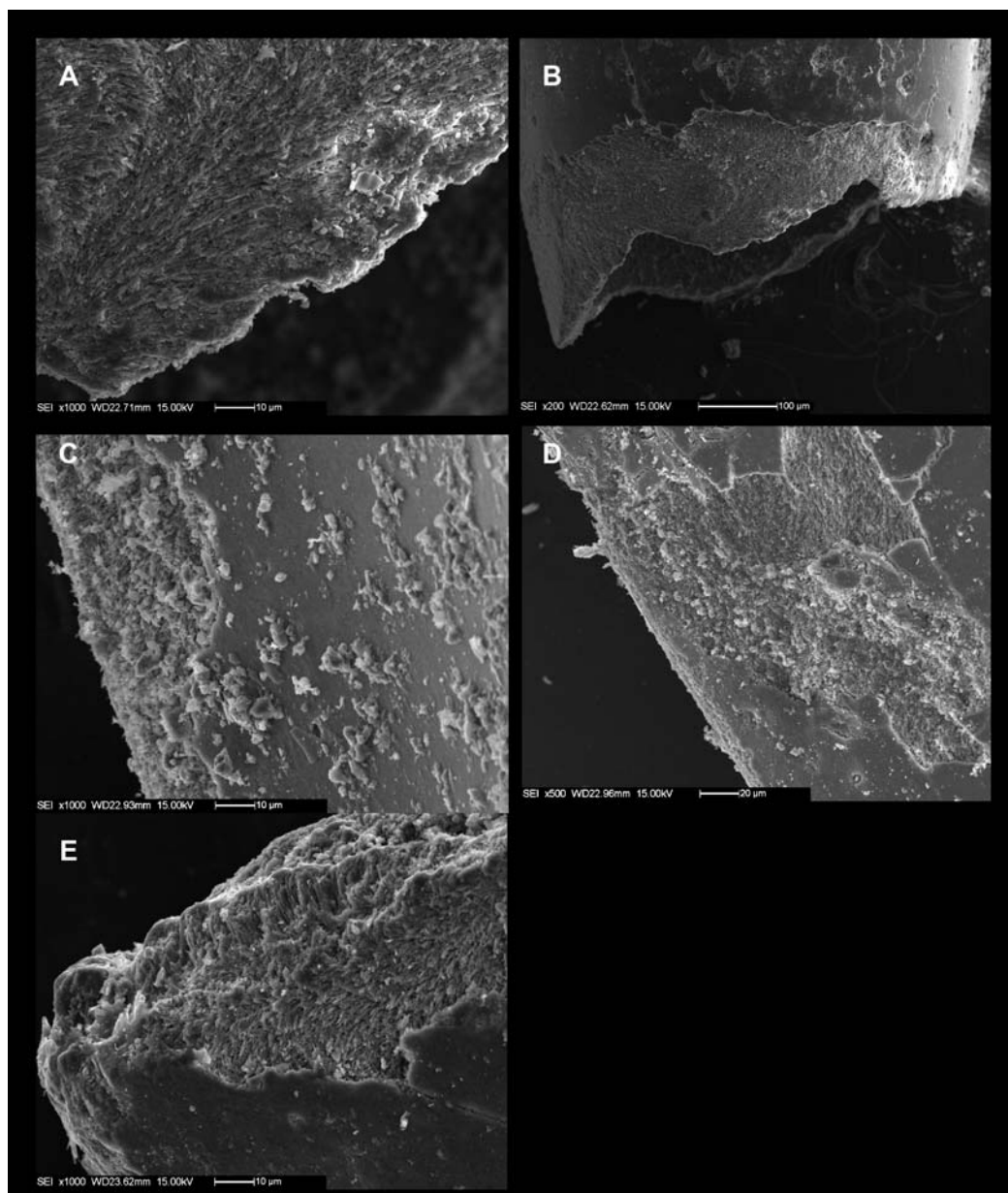


Fig. 70. Dettagli della protoconca (B) e della fogliettatura sulla superficie (A, C-E).

Sono stati analizzati anche i singoli frammenti, entrambi disposti con la superficie interna rivolta verso l'alto (Fig. 69E). In questo modo è possibile analizzare la superficie interna della parete dorsale. Su questo lato è visibile la struttura della parete interna, che è costituita da prismi di aragonite disposti parallelamente tra loro (Fig. 71B, per il primo frammento e 71H, 69H, 69D per il secondo frammento)

La frattura sul lato sinistro del primo frammento è avvenuta lungo una direzione preferenziale, parallela alla piega dorsale dello pteropode, ciò spiega la sua

geometria rettilinea. Tale frattura mostra i due strati prismatici esterni aragonitici. Le pareti esterne che lo racchiudono sono molto sottili in questo esemplare. Si può pensare quindi che in questa modalità di preservazione (classe B) la dissoluzione agisca con l'intaccamento e assottigliamento della parete esterna che porta all'esposizione dei prismi aragonitici (Fig. 72A,C).

Proseguendo verso il basso lungo la frattura si incontra un tratto in cui è esposto gran parte dello strato prismatico, con la sua caratteristica forma elica (Fig. 72C,E-F).

Sul lato interno di entrambi i frammenti sono visibili delle incrostazioni (Fig. 72G, 71A per il primo frammento; 71G, 69C per il secondo frammento).

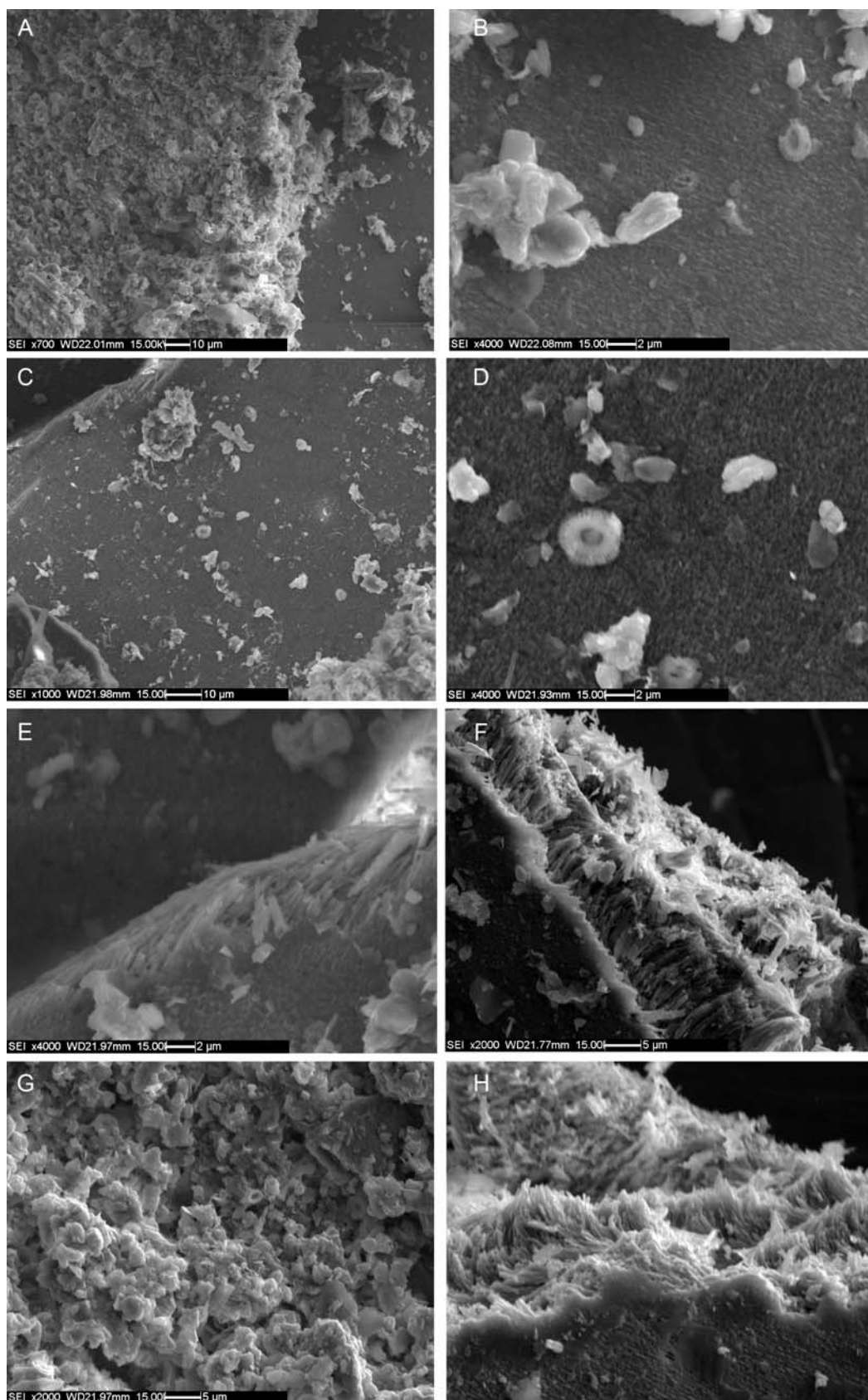


Fig. 71. Dettagli di alcuni punti della frattura fresca praticata sul lato dorsale.

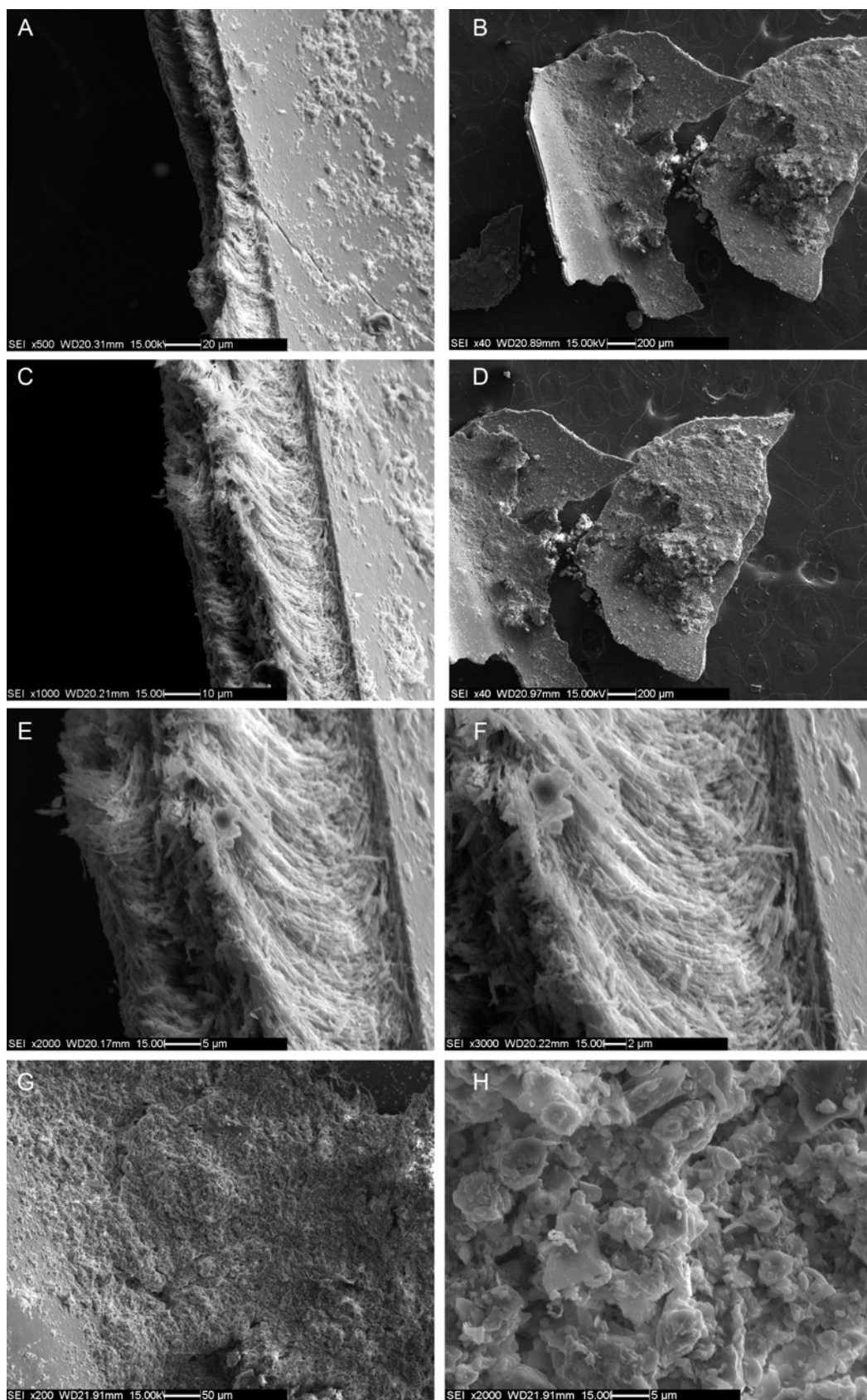


Fig. 72. Dettagli di alcuni punti della frattura fresca praticata sul lato dorsale.

Classe C1 – T74-65_2 bis

Il campione è stato frammentato asportando una porzione della piastra ventrale, in un punto di debolezza della stessa. Il primo frammento analizzato (Fig. 73E) è disposto con il lato esterno rivolto verso l'alto, mentre il secondo espone la parete interna (Fig. 73F.). I dettagli (Fig. 74E-F, 73D) della frattura mettono in luce il distacco della parete esterna e i prismi aragonitici sottostanti.

La parete interna del secondo frammento mostra la disposizione parallela dei prismi aragonitici (Fig. 75C-D) e, in qualche punto, dei piccoli solchi derivanti dalla scavatura dello strato più interno (Fig. 75E, H, 74B). Sono presenti anche delle strutture dovute all'esfoliazione della parete interna in maniera più superficiale rispetto ai solchi, ma più estesa spazialmente (74A, C). In quest'ultimo caso le parti esposte mostrano delle fibre corte e molto assottigliate. È da notare che in prossimità della frattura le fibre che costituiscono lo strato esterno sono molto assottigliate, 'sfilacciate' e 'appiattite', tanto da far dimenticare la loro struttura prismatica. Sulla parete interna sono presenti sporadicamente delle incrostazioni, che probabilmente costituiscono il residuo del riempimento con cui il frammento si trovava a contatto.

La parete esterna del terzo frammento (Fig. 76B) è esposta verso l'alto e mostra una superficie levigata con qualche piccolo solco (Fig. 73A) e qualche incrostazione esterna (Fig. 73A, C). In prossimità della frattura si vedono le fibre assottigliate della parete esterna, simili a quelle presenti sulla parete interna, ma meno alterate. La rimozione della parete esterna mette in evidenza i prismi aragonitici sottostanti (Fig. 76G, 73B). Il quarto frammento analizzato è disposto con la frattura verso l'alto (Fig. 73G). In questo modo è possibile osservare la microstruttura completa della parete: si osservano i due strati di fibre elicoidali con uno spessore ridotto rispetto a quello degli strati interni delle classi precedenti. Inoltre in questo caso la parete esterna e quella interna sono quasi inesistenti e ciò concorda con le fibre sfilacciate osservate negli altri frammenti. Uno degli strati più interni sembra molto ben conservato, con prismi dalla forma perfettamente regolare (Fig. 73H-77A-B).

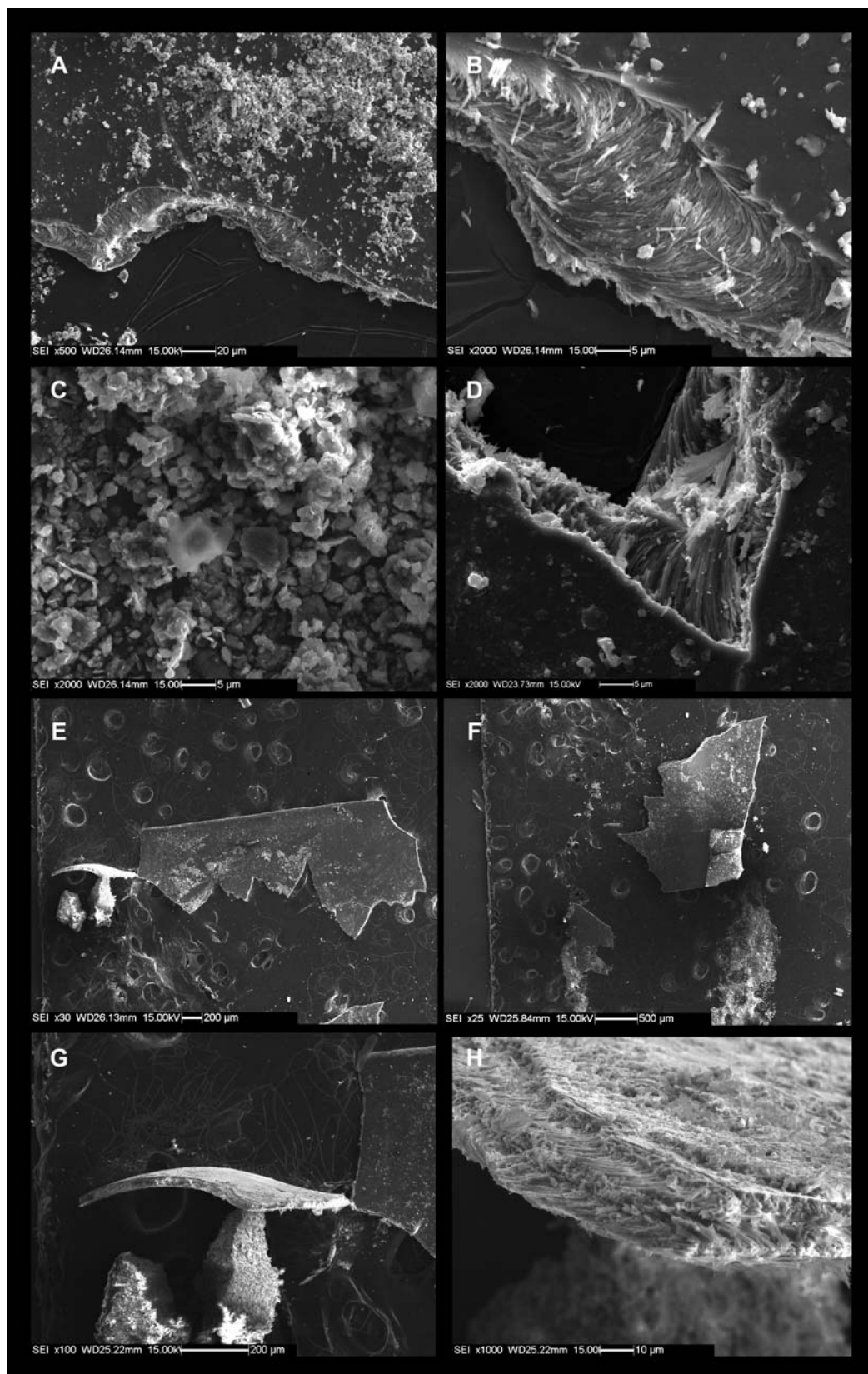


Fig. 73. Dettagli e panoramiche (E-G) dei frammenti freschi del guscio.

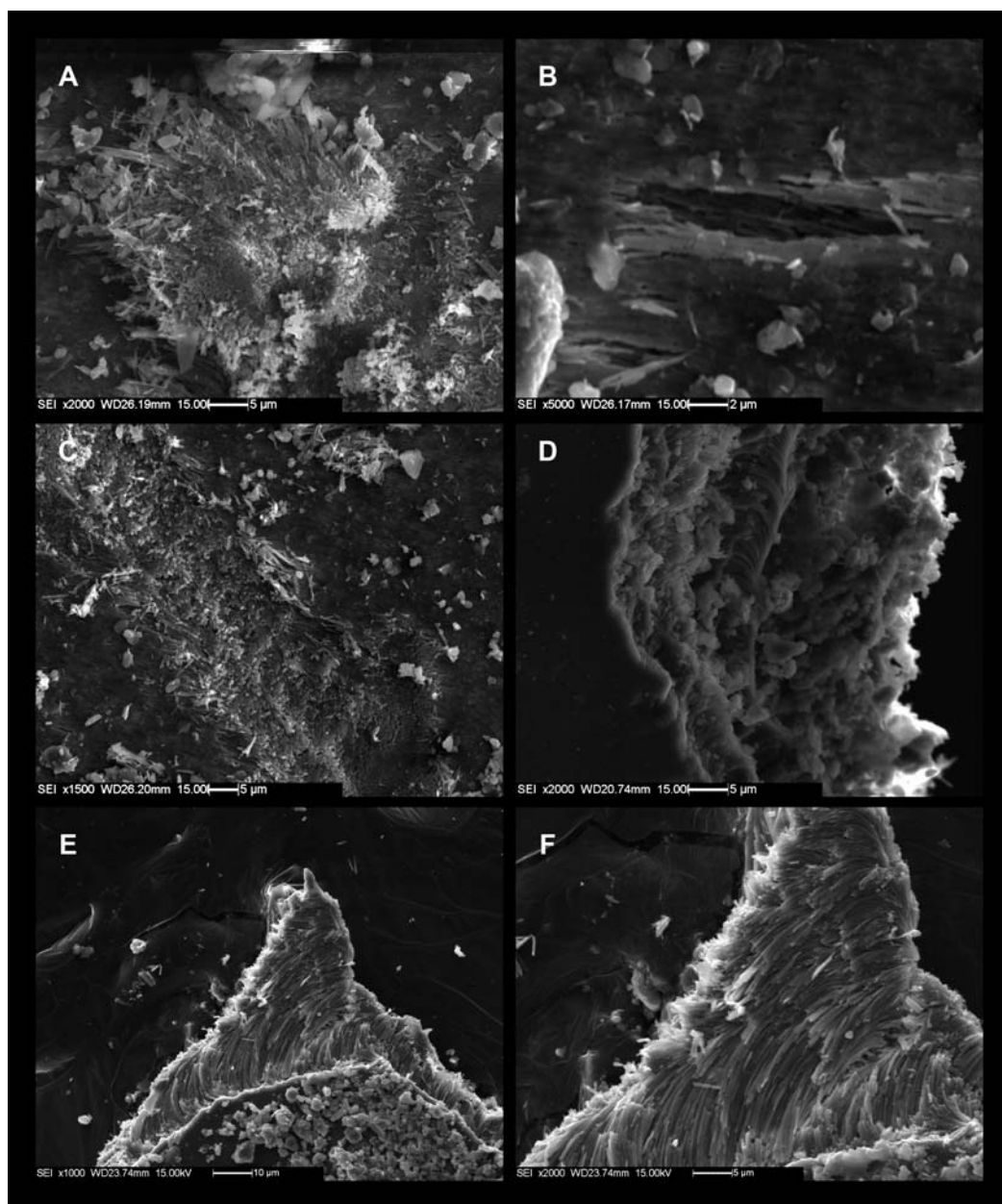


Fig. 74. Panoramica del frammento fresco (E-F) e dettagli della struttura delle fratture.

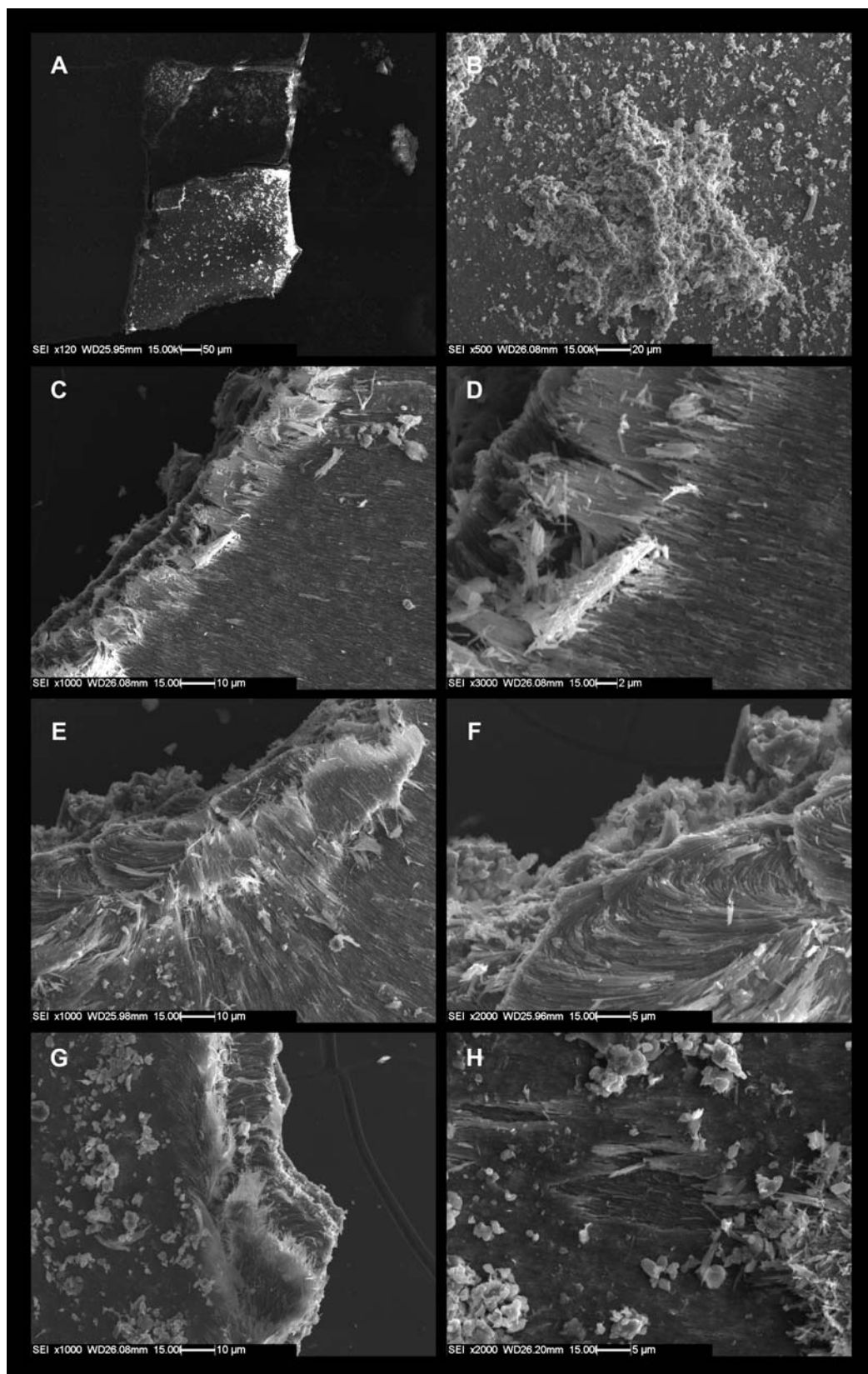


Fig. 75. Dettagli delle fibre di aragonite emerse lungo le superfici di frattura.

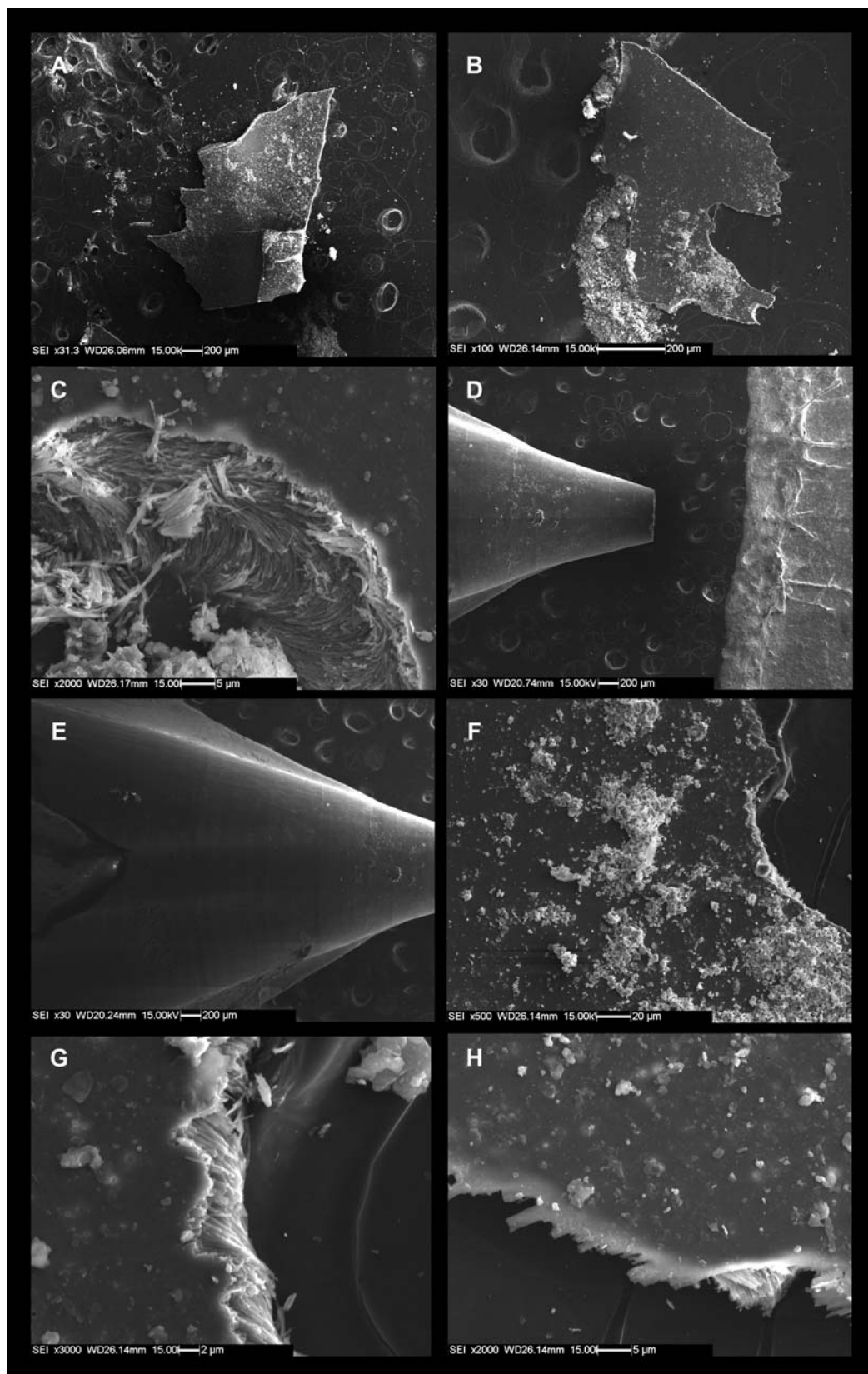


Fig.76. Panoramiche dei campioni del guscio analizzati sia integri che fratture fresche.

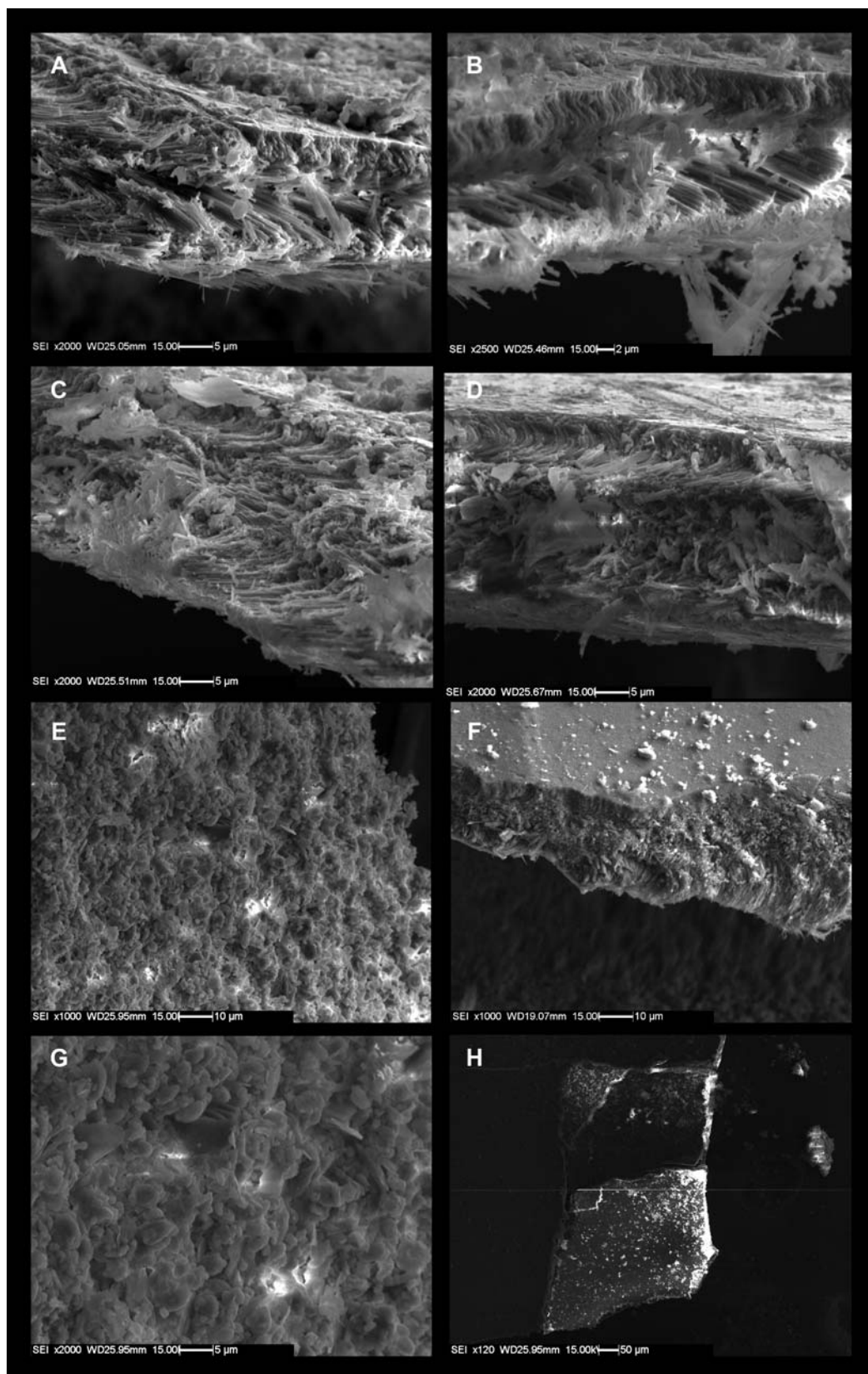


Fig. 77. Dettagli delle fibre di aragonite emerse dalle fratture fresche.

Classe D – J73-17_6bis

L'esemplare è costituito dal solo modello interno ed è molto alterato con presenza di solchi (Fig. 79A, 80B, F) e concrezioni superficiali (Fig. 7, 78A-C).

I bordi laterali sono molto alterati, e non riproducono perfettamente i dettagli della conchiglia originale. In particolare il bordo esterno sinistro (destro nelle immagini) del modello interno presenta una struttura molto particolare, probabilmente generata da una forte corrosione, che ha levigato la superficie fino renderla dall'aspetto quasi amorfo (Fig. 78E-H, 79B-C, 80A). Tali strutture sono intervallate da concrezioni sia al di sotto sia al di sopra della loro superficie. In alcuni punti queste superfici levigate presentano delle crepe e si frammentano in maniera geometriche (Fig. 79C, G-F).

Un'altra particolarità è la presenza di un foro molto grande all'altezza della parte apicale del modello interno. Questo foro ha all'interno delle strutture smussate simili a quelle descritte precedentemente (Fig. 79F). Il modello interno in questione è una variazione rispetto all'altro della classe D, perché è molto più alterato superficialmente, l'altro presenta una superficie più liscia.

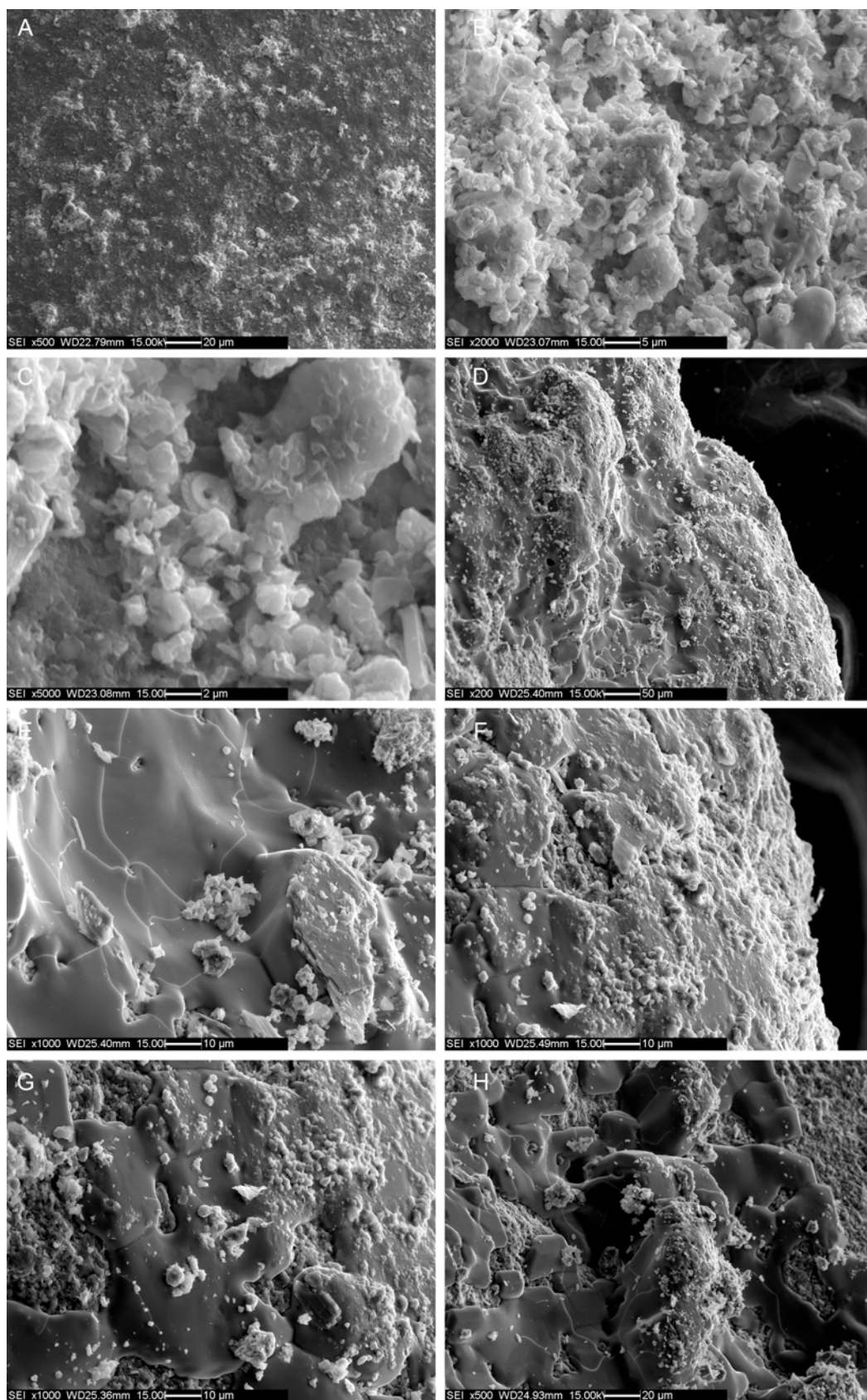


Fig. 78. Dettagli della struttura del modello interno e concrezionamenti di aspetto amorfo.

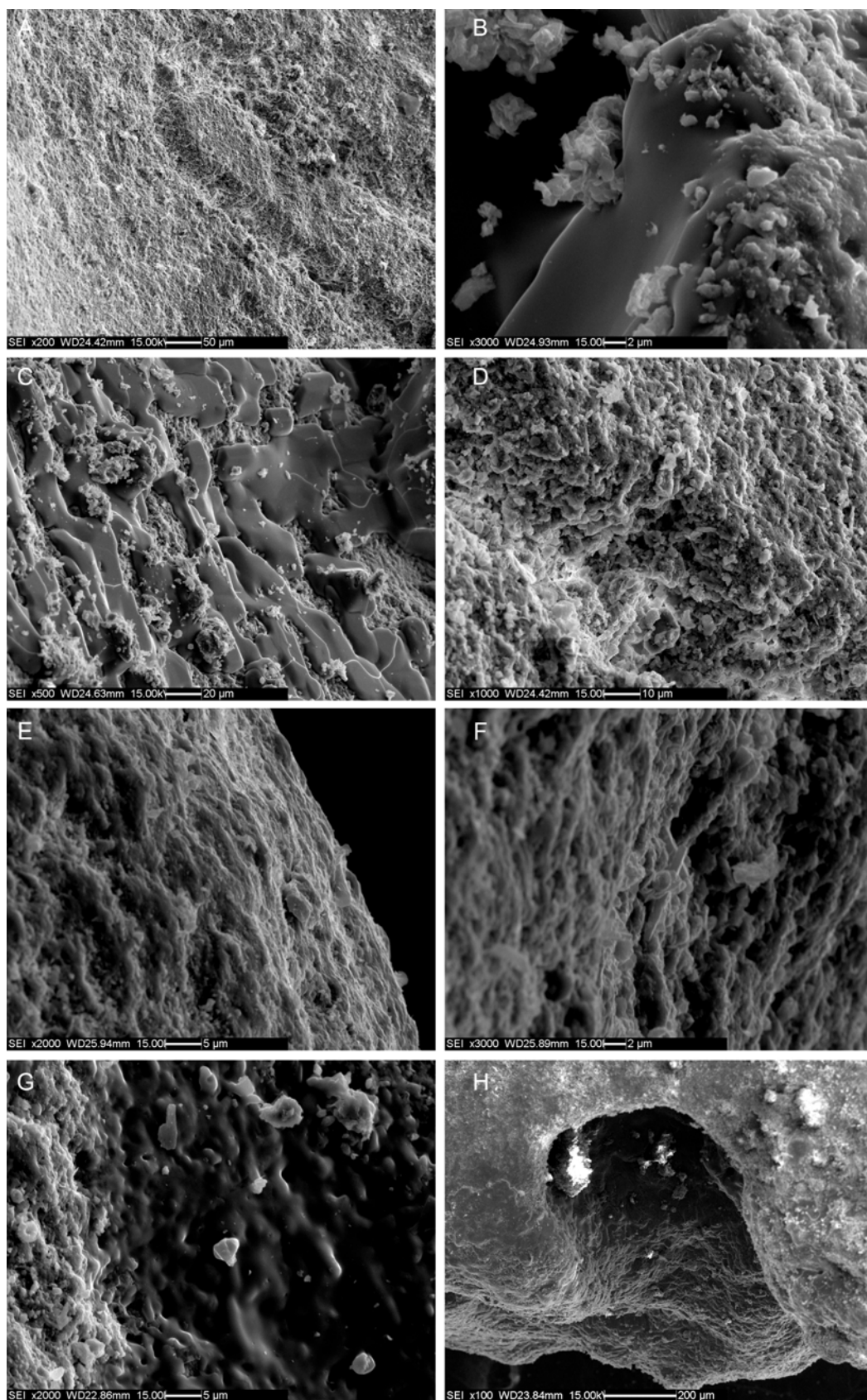


Fig. 79. Dettagli della struttura del modello interno e concrezionamenti di aspetto amorfo.

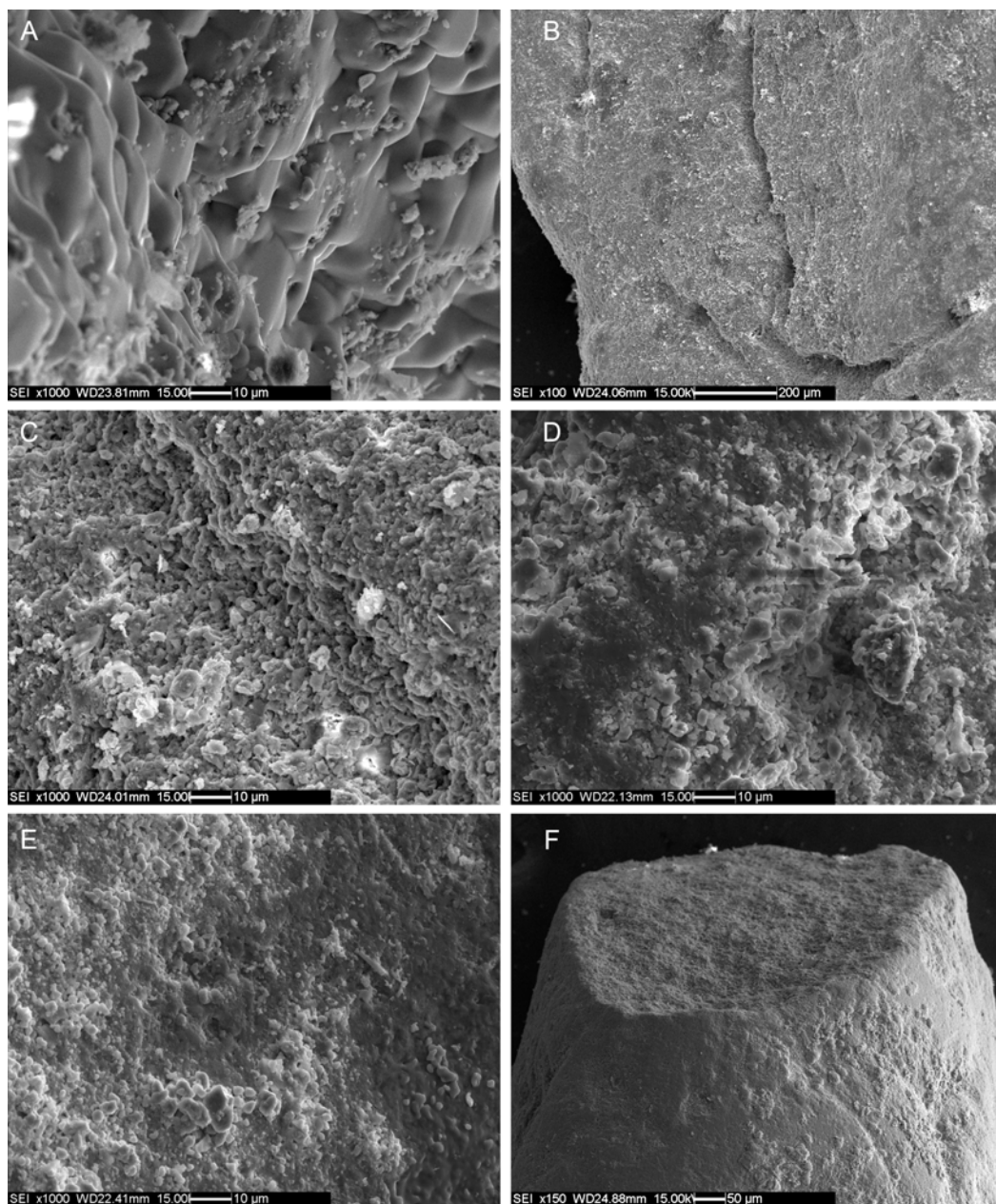


Fig. 80. Dettagli della struttura del modello interno e concrezionamenti di aspetto amorfo.

5. CONCLUSIONI

Le analisi al microscopio ottico, effettuate durante la prima parte del lavoro hanno permesso di analizzare un'ampia casistica di pteropodi appartenenti a diverse specie e di individuarne la modalità di ritrovamento prevalente all'interno dei campioni, che è rappresentata dal modello interno. Mediante questo tipo di analisi sono stati ulteriormente selezionati, all'interno della stessa specie, degli esemplari rappresentativi di una progressione di alterazione diagenetica.

L'analisi al microscopio a scansione, sugli esemplari di *Clio pyramidata*, ha permesso di individuare delle modificazioni microstrutturali imputabili alla dissoluzione diagenetica. L'attribuzione dei processi dissolutivi alla diagenesi precoce è alquanto realistica, anche in considerazione del fatto che le conchiglie degli pteropodi selezionati sono state sottratte ad una eventuale dissoluzione dovuta ad una diminuzione dello stato di saturazione dell'aragonite legata al fenomeno dell'acidificazione dei mari, mediante seppellimento all'interno dei sedimenti.

La scelta dei campioni da analizzare è ricaduta su pteropodi sub fossili, poiché, essendo svincolati dal processo di acidificazione, permettono di analizzare le modificazioni microstrutturali indotte da processi che avvengono normalmente all'interno dei sedimenti.

Le morfologie riscontrate a livello micro strutturale negli esemplari presi in esame, sono in alcuni casi simili a quelle definite nell'ambito di alcuni lavori riguardanti gli effetti dell'acidificazione sugli pteropodi vivi. Questa osservazione può portare a ipotizzare che la dissoluzione diagenetica abbia sugli pteropodi un effetto confrontabile con la dissoluzione indotta da condizioni chimiche simili a quelle che si possono incontrare in un processo di diminuzione dello stato di saturazione del carbonato di calcio a causa dell'aumento della CO₂ antropogenica (acidificazione).

Pertanto l'interpretazione dei segnali di corrosione degli esoscheletri carbonatici deve essere fatta tenendo in considerazione il processo di diagenesi, in modo da discriminare questo tipo di segnale.

L'obiettivo di questo studio è quello di dimostrare l'importanza del processo di diagenesi precoce, e di porre le basi per eventuali studi futuri riguardanti gli effetti dell'acidificazione sugli pteropodi *post-mortem*.

BIBLIOGRAFIA

- Almogi-Labin, A. and Reiss, Z., 1977. Quaternary pteropods from Israel. *Rev. Esp. Micropaleontol.*, 9(1): 5-48.
- Almogi-Labin A., Luz B., Duplessy J.-C., 1986. Quaternary paleo-oceanography, pteropod preservation and stable-isotope record of the Red Sea. *Paleogr. Pleoclimatol. Paleoecol.* 57, 195-211.
- Appeltans W., Bouchet P., Boxshall G.A., De Broyer C., de Voogd N.J., Gordon DP, Hoeksema BW, Horton T, Kennedy M, Mees J, Poore GCB, Read G, Stöhr S, Walter TC, Costello MJ. (eds) (2012). *World Register of Marine Species*. Accessed at <http://www.marinespecies.org> on 2012-10-04.
- Bernardsek N., Tarling G. A., Bakker D. C., Fielding S., Cohen A., Kuzirian A., Mc Corkle D., Lézé B., Montagna R., 2012. Description and quantification of pteropod shell dissolution: a sensitive bioindicator of ocean acidification. *Global change biology* 18, 2378-2388.
- Berger W.H., 1977. Deep-sea carbonate: pteropod distribution and the aragonite compensation depth. *Deep-Sea Research*, Vol. 25, pp. 447 to 452
- Buccheri & di Stefano, 1984 Buccheri G., Stefano E. di, 1984. Contributo allo studio del Golfo di Pozzuoli. Pteropodi e nannoplankton calcareo contenuti in tre carote: considerazioni ambientali e biostratigrafiche. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 27: 181-193.
- Buccheri e Torelli, 1981 Buccheri G., Torelli L., 1981. Stratigraphy and paleoclimatic evaluations of the cores BS77-15 and BS77-33 (Sardinia Basin, western Tyrrhenian Sea) by means of pteropod assemblages. *Ateneo Parmense, Acta Naturalia*, 17: 73-94.
- Comeau S., Gorsky G., Jeffree R., Teyssié J.-L., Gattuso J.-P., 2009. Impact of ocean acidification on a key Arctic pelagic mollusc (*Limacina helicina*). *Biogeosciences* 6, 1877-1882.
- Comeau S., Gorsky G., Alliouane S., Gattuso J.-P., 2010. Larvae of the pteropod *Cavolinia inflexa* exposed to aragonite undersaturation are viable but shell-less. *Marine Biology* 157, 2341-2345.
- Curry D., 1965. The English Palaeogene pteropods. *Proceedings of the Malacological Society of London*, 36: 357-371.

- Di Geronimo I., 1970. Heteropoda e Pteropoda Thecosomata in sedimenti abissali recenti dello Jonio. *Thalassia Salentina*, 4: 41-115.
- Doney S. C., Fabry V. J., Feely R. A., Kleypas J. A., 2009. Ocean Acidification: The Other CO₂ Problem. *Annual Review of Marine Science* 1, 169-192.
- Feely R. A., Sabine C. L. Lee K., Berelson W., Kleypas J. Fabry V. J., Millero F. J., 2004. Impact of Anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ System in the Oceans. *Science* 305, 362-366.
- Gattuso J.-P., Hansson L., 2011. *Ocean Acidification*. Oxford University Press, 326 pp.
- Guinotte J. M., Fabry V. J., 2008. Ocean Acidification and its potential effects on marine ecosystems. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1134, 320-342.
- Herman 1971 Herman Y., 1971a. Quaternary climate changes in the eastern Mediterranean as recorded by pteropods and planktonic Foraminifera. In: Farinacci A. (ed.). *Second International Plankton Conference. Proceedings*. Tecno-Scienza, Roma: 611-622.
- Herman Y., 1973. Preliminary pteropod results from the Mediterranean Sea. *Initial Reports Deep Sea Drilling Project*, 13: 993-1001.
- Herman 1973 Preliminary pteropod results from the Mediterranean Sea.
- Herman-Rosenberg 1965 Herman Y. & Rosenberg P.E., 1971. *Pteropods as sea level indicators*. In: Ters M. (ed.). *Études sur le Quaternaire dans le monde. Union internationale pour l'Étude du Quaternaire. VIIIe Congrès INQUA, Paris 1969*, 1: 187-190.
- Hönisch B., Hemming N. G., Archer D., Siddal M., Mc Manus J. F., 2009. Atmospheric carbon dioxide concentration across the Mid-Pleistocene transition. *Science* 324, 1551-1554.
- Ivanova E. V., 1985. Late Quaternary biostratigraphy and paleotemperatures of the Red Sea and the Gulf of Aden based on planktonic Foraminifera and pteropods. *Marine Micropaleontology*, 9: 335-364.
- Janssen A.W., 2010. Systematics and biostratigraphy of holoplanktonic Mollusca from the Oligo-Miocene of the Maltese Archipelago. *Boll. Mus. Reg. Sci. Nat. Torino*. Vol.28-N.2. pp 197-601.

- Janssen A.W., King C., 1988. Planktonic molluscs (Pteropods). In: Vinken R., Daniels C. H. von, Gramann F., Köthe A., Knox R. W. O'B, Kockel F., Meyer K.-J., Weiss W. (eds), The northwest European Tertiary Basin. Results of the International Geological Correlation programme Project no. 124 (pp.356-368). Geologisches Jahrbuch, (A) 100.
- Janssen A. W., 2012. Late Quaternary to Recent holoplanktonic Mollusca (Gastropoda) from bottom samples of the eastern Mediterranean Sea: systematics, morphology. Boll Malacol., 48: 1-105 (suppl. 9, 2012).
- Lalli C.M., Gilmer R.W., 1989. Pelagic snails. The biology of holoplanktonic mollusks. Stanford, California, Stanford University Press: i-viii, 1-259.
- Lischka S., Büdenbender J., Boxhammer T., Riebesell U., 2011. Impact of ocean acidification and elevated temperatures on early juveniles of the polar shelled pteropod *Limacina helicina*: mortality, shell degradation, and shell growth. Biogeosciences 8, 919-932.
- Manzi V., Roveri M., Gennari R., Bertini A., Biffi U., Giunta S., Iaccarino S.M., Lanci L., Lugli S., Negri A., Riva A., Rossi M.E., Taviani M. (2007). The deep-water counterpart of the Messinian Lower Evaporites in the Apennine foredeep: the Fanantello section (Northern Apennines, Italy). Palaeo3, 251, 470-499.
- Mc Neil B. I., Matear R., 2007. Climate change feedbacks on future oceanic acidification. Tellus 59B, 191-198.
- Millero F.J., Morse J., Chen C.-T., 1979. The carbonate system in the western Mediterranean Sea. Deep Sea Research, Vol. 26A pp 1395-1404.
- Orr J. C., Fabry V. J., Aumont O., Bopp L., Doney S. C., Feely R. A., Gnanadesikan A., Gruber N., Ishida A., Joos F., Key R. M., Lindsay K., Maier-Reimer E., Matear R., Monfray P., Mouchet A., Najjar R. G., Plattner G.-K., Rodgers K. B., Sabine C. L., Sarmiento J. L., Schlitzer R., Slater R. D., Totterdell I. J., Weirig M.-F., Yamanaka Y., Yool A., 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organism. Nature 437, 681-685.
- Robba E., 1977 Associazioni a Pteropodi nel Miocene inferiore delle Langhe (Piemonte), Rivista italiana di paleontologia e stratigrafia, 78(03), 1972, pp. 467-524
- Spoel S. van der 1967. Euthecosomata, a group with remarkable developmental

- stages (Gastropoda, Pteropoda) (thesis University of Amsterdam). J. Noorduijn, Gorinchem: 1-375.
- Spoel S. van der, 1976. Pseudothecosomata, Gymnosomata and Heteropoda (Gastropoda). Bohn, Scheltema & Holkema, Utrecht: 1-484.
- Spoel S. van der, Dadon J.R. 1999. Pteropoda. p. 649-706. In D. Boltovskoy, (ed.). South Atlantic Zooplankton. Vol.1. Leiden: Backhuys Publishers.
- Steinacher M., Joos F., Frolicher T. L., Plattner G.-K., Doney S. C., 2009. Imminent ocean acidification in the Arctic projected with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model. *Biogeosciences* 6, 515-533.
- Thiriot-Quiévreux C., 1975. Observations sur les larves et les adultes de Carinariidae (Mollusca: Heteropoda) de l'Océan Atlantique Nord. *Marine Biology* 32, 379-388 (1975)
- Wall-Palmer D., Hart M. B., Smart C. W., Sparks R. S. J., Le Friant A., Boudon G., Deplus C., Komorowski J. C., 2012. Pteropods from the Caribbean Sea: variations in calcification as an indicator of past ocean carbonate saturation. *Biogeosciences* 9, 309-315.
- Zhang T., Ma Y., Chen K., Kunz M., Tamura N., Qiang M., Xu J., Qi L., 2011. Structure and Mechanical Properties of a Pteropod Shell Consisting of Interlocked Helical Aragonite Nanofibers. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2011, 50, 10361 –10365
- Zeebe R. E., Zachos J. C., Caldeira K., Tyrrell T., 2008. Ocean: Carbon Emissions and Acidification. *Science* 321, 51-52.